

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERÍA**

**ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE LA TÉCNICA OFDM
SOBRE CANALES DISPERSIVOS**

PABLO SEBASTIÁN CALDERÓN VALAREZO

SANGOLQUÍ – ECUADOR

2007

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente proyecto de grado titulado “ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE LA TÉCNICA OFDM SOBRE CANALES DISPERSIVOS” fue realizado en su totalidad por el señor Pablo Sebastián Calderón Valarezo bajo nuestra dirección.

Ing. Rubén León
DIRECTOR

Ing. Rodrigo Silva
CODIRECTOR

RESUMEN DEL PROYECTO

En este proyecto se realiza un análisis mediante un simulador implementado en Simulink de MATLAB del desempeño de la multiplexación por división de frecuencia ortogonal sobre el medio característico en el cual esta técnica opera, el canal dispersivo. Este análisis conllevó a realizar un estudio preliminar de los dos elementos mencionados cuya interacción sería evaluada: el canal dispersivo y la técnica OFDM. Para el caso del canal dispersivo el estudio consistió en definir los parámetros que lo caracterizan y encontrar un modelo de canal que sería utilizado como base para la implementación del medio de transmisión en el simulador. El modelo de canal dispersivo seleccionado fue aquel propuesto por la Universidad de Stanford, el cual define seis tipos de canal cuyas características varían dependiendo de la densidad de obstrucción entre transmisor y receptor. Posteriormente el estudio se centró en encontrar los componentes que definen el desempeño de la técnica OFDM. Una vez hecho esto se procedió a implementar en el simulador el canal dispersivo y el transmisor y receptor OFDM. Para los valores de los parámetros OFDM se tomó como referencia aquellos utilizados por la tecnología WiMAX. Finalmente, al obtener los resultados de las pruebas realizadas en el simulador, se pudo apreciar como la densidad de obstrucción entre el transmisor y el receptor, traducido en valores de atenuación y retardo, degradan el rendimiento de las transmisiones OFDM.

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo a todas aquellas personas que de una u otra manera me ayudaron, entre ellos: a mi papá y a mi mamá por su apoyo moral, a mi director y codirector de tesis por su consejo oportuno y a mis amigos por siempre creer en mí.

AGRADECIMIENTO

A mi papá Eduardo Calderón, a mi mamá Mirtha Valarezo, al Ing. Rubén León y al Ing. Rodrigo Silva. Agradezco a todos ellos por la paciencia que tuvieron al ayudarme a culminar este proyecto. Un especial agradecimiento a Cindy Romero por brindarme la tranquilidad espiritual necesaria que me permitió seguir adelante.

PRÓLOGO

A medida que avanza el mundo de las telecomunicaciones, la demanda por nuevas tecnologías que permitan transmitir información cada vez a mayores distancias y a altas velocidades va incrementando. En los últimos años tecnologías como WiFi y WiMAX han emergido para posicionarse como los nuevos estándares para la transferencia inalámbrica de datos a alta velocidad. Detrás de todas estas tecnologías existen varias técnicas que brindan la base conceptual que sustenta su gran rendimiento y flexibilidad. Una de las principales técnicas que es utilizada en las tecnologías de transmisión inalámbrica mencionadas es la multiplexación por división de frecuencia ortogonal. La técnica OFDM ha permitido superar la degradación que sufría la información al viajar a través del medio de comunicación inalámbrico. Debido a la utilización de esta técnica, las comunicaciones inalámbricas han alcanzado mayores velocidades en la transmisión y mayor confiabilidad en general, de ahí la importancia del estudio de la técnica OFDM y del canal de comunicación inalámbrico.

El título del proyecto refleja su principal objetivo, realizar un análisis del rendimiento de la técnica OFDM sobre los canales inalámbricos dispersivos. El contenido de los capítulos que constituyen este trabajo se enfoca a cumplir con este objetivo, para lo cual primero se realiza un estudio para definir las características tanto de la técnica OFDM así como de los canales dispersivos. Este estudio permitió continuar con la siguiente etapa del proyecto, en la cual se realiza una implementación de un sistema de comunicaciones OFDM y de un canal dispersivo. Para concluir, se realizan las pruebas tendientes a evaluar el desempeño de la técnica sobre el tipo de canal inalámbrico dispersivo y se analizan los resultados obtenidos.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPITULO 1: INTRODUCCION.....	1
1.1 COMUNICACIONES INALAMBRICAS.....	1
1.1.1 Historia de las Comunicaciones Inalámbricas.....	1
1.1.2 Sistemas Inalámbricos Actuales.....	4
• Sistemas de telefonía celular.....	4
• Teléfonos inalámbricos.....	5
• Redes de área local inalámbricas.....	6
• Servicios de datos inalámbricos de área amplia.....	7
• Acceso inalámbrico de banda ancha.....	7
• Sistemas de <i>paging</i>	8
• Redes satelitales.....	9
• Radios de baja-potencia bajo-costos: Bluetooth y Zigbee.....	9
• Radios de banda ultra ancha.....	10
1.1.3 El Espectro Inalámbrico.....	10
1.2 CARACTERISTICAS DE LOS CANALES INALAMBRICOS.....	12
1.2.1 Desvanecimiento de Escala Grande.....	13
1.2.2 Desvanecimiento de Escala Pequeña.....	14
• Esparcimiento en el tiempo de la señal en el dominio del tiempo...	14
• Esparcimiento en el tiempo de la señal en el dominio de la frecuencia.....	15
• Variación en el tiempo del canal visto en el dominio del tiempo...	16
• Variación en el tiempo del canal visto en el dominio de la frecuencia.....	17
1.2.3 Modelos de Canales Inalámbrico.....	18
• Canales COST 207.....	18
• Canales SUI.....	19
1.2.4 El Canal Dispersivo.....	21
1.3 TECNICAS DE ACCESO MULTIPLE.....	22
1.3.1 Acceso Múltiple/Multiplexación por División de Frecuencia (FDMA)	22
1.3.2 Acceso Múltiple/Multiplexación por División de Tiempo (TDMA)....	23

1.3.3	Acceso Múltiple/Multiplexación por División de Código (CDMA)....	23
1.3.4	Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA)....	24
1.4	EVOLUCION HISTORICA DE LA TECNICA OFDM.....	25
1.4.1	Primeras Contribuciones.....	25
1.4.2	Rango de Potencia Pico a Media.....	26
1.4.3	Sincronización.....	27
1.4.4	Antenas Adaptativas.....	27
1.4.5	Aplicaciones OFDM.....	27
1.5	VISTA PRELIMINAR DEL CONTENIDO DEL PROYECTO.....	28
CAPITULO 2: OFDM.....		30
2.1	PRINCIPIOS BASICOS DE UN SISTEMA OFDM.....	30
2.1.1	FDM y OFDM.....	31
2.1.2	QAM – OFDM.....	33
2.1.3	OFDM Utilizando FFT.....	35
	• La transformada de Fourier.....	36
2.1.4	Modelo Matemático OFDM.....	37
2.1.5	Prefijo Cíclico.....	38
2.2	CARACTERISTICAS DE RENDIMIENTO DE LOS SISTEMAS OFDM...	39
2.2.1	Sistemas Seriales y Sistemas Paralelos.....	39
2.2.2	OFDM Sobre Canales Dispersivos.....	40
	• AWGN y OFDM.....	40
	• Sistemas OFDM y el multitrayecto.....	40
2.2.3	Implementación de los Sistemas OFDM.....	42
	• Implementación de módems OFDM utilizando FFT.....	43
	• <i>Offset</i>	43
	• Ruido de fase.....	44
	• Proporción pico a media (PAR)	45
	• Métodos para controlar el PAR.....	46
CAPITULO 3: DISEÑO E IMPLEMENTACION DEL SIMULADOR		
OFDM.....		48
3.1	HERRAMIENTAS DE SIMULACION.....	48

3.1.1	MATLAB.....	48
3.1.2	Simulink.....	50
3.2	ARQUITECTURA GENERAL DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN OFDM.....	51
3.3	IMPLEMENTACION DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN OFDM.....	52
3.3.1	Adquisición de las Señales de Entrada.....	52
	• Generación de números binarios.....	53
	• Generación de imágenes.....	53
	• Generación de sonidos.....	54
3.3.2	Transmisor OFDM.....	55
	• <i>Rectangular QAM modulator baseband</i>	55
	• <i>Buffer</i>	56
	• <i>IFFT</i>	56
	• <i>Selector</i>	57
	• <i>Unbuffer</i>	57
3.3.3	Canal de Transmisión.....	57
3.3.4	Receptor OFDM.....	59
	• <i>Buffer</i>	60
	• <i>Selector</i>	60
	• <i>FFT</i>	60
	• <i>Frame status conversión</i>	61
	• <i>Unbuffer</i>	61
	• <i>Rectangular QAM demodulator baseband</i>	61
3.3.5	Presentación de las Señales de Salida y Cálculo de errores.....	61
	• Presentación de binarios.....	63
	• Presentación de imágenes.....	63
	• Presentación de sonido.....	63
3.3.6	Control de Duración de la Simulación.....	63
3.3.7	Interfaz de usuario del Simulador OFDM.....	65
3.4	SINTESIS DEL USO DEL SIMULADOR.....	66

CAPITULO 4: EVALUACION DEL SISTEMA.....	68
4.1 DEFINICION DE LOS PARAMETROS DEL SISTEMA DE SIMULACION.....	68
4.1.1 Valores de los Parámetros Utilizados en el Transmisor y el Receptor OFDM.....	69
• Tasa de transmisión.....	69
• Tipo de modulación.....	70
• Dimensión de la conversión serial a paralelo – paralelo a serial y de la transformada rápida de Fourier.....	71
• Longitud del prefijo cíclico.....	72
• Parámetro de retardo para el cálculo de errores.....	73
4.1.2 Valores de los Parámetros Utilizados en el Canal de Transmisión.....	74
4.2 DISEÑO DE LAS PRUEBAS.....	75
4.3 IMPLEMENTACION DE LAS PRUEBAS.....	76
4.4 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS.....	76
4.4.1 Resultados de las Pruebas con Binarios como Señal de Entrada.....	77
4.4.2 Resultados de las Pruebas con Imagen como Señal de Entrada.....	77
4.4.3 Resultados de las Pruebas con Sonido como Señal de Entrada.....	80
4.5 ESTUDIO COMPARATIVO.....	83
 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	85
CONCLUSIONES.....	85
RECOMENDACIONES.....	88
 ANEXOS.....	91
ANEXO 1.....	91
ANEXO 2.....	92
ANEXO 3.....	93
ANEXO 4.....	94
ANEXO 5.....	95
ANEXO 6.....	96
ANEXO 7.....	97
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	98

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla. 1.1. Características de los estándares 802.16.....	8
Tabla. 1.2. Servicios inalámbricos en bandas de frecuencias licenciadas.....	11
Tabla. 1.3. Servicios inalámbricos en bandas de frecuencias no licenciadas.....	11
Tabla. 1.4. Modelos de perfil de retardo propuestos por el proyecto COST 207...	19
Tabla. 1.5. Canales SUI – 1 a SUI – 3 Escenario 1.....	20
Tabla. 1.6. Canales SUI – 4 a SUI – 6 Escenario 1.....	20
Tabla. 1.7. Canales SUI – 1 a SUI – 3 Escenario 2.....	21
Tabla. 1.8. Canales SUI – 4 a SUI – 6 Escenario 2.....	21
Tabla. 4.1. Valores obtenidos de potencia.....	75
Tabla. 4.2. Valores de BER ante la variación de SNR de los canales SUI para binarios.....	77
Tabla. 4.3. Valores de BER ante la variación de SNR de los canales SUI para imagen.....	78
Tabla. 4.4. Valores de BER ante la variación de SNR de los canales SUI para sonido.....	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura. 1.1. Manifestaciones de los canales desvanecedores.....	13
Figura. 1.2. Perfil de retardo.....	14
Figura. 1.3. Caso de desvanecimiento selectivo en frecuencia $f_0 < W$	16
Figura. 1.4. Caso de desvanecimiento no selectivo en frecuencia $f_0 > W$	16
Figura. 1.5. Acceso múltiple por división de frecuencia.....	23
Figura. 1.6. Acceso múltiple por división de tiempo.....	23
Figura. 1.7. Acceso múltiple por división de código.....	24
Figura. 2.1. Diagrama de bloques simplificado del módem paralelo ortogonal.....	31
Figura. 2.2. OFDM vs FDM.....	32
Figura. 2.3. a.Espectro de un canal OFDM b.Espectro de una señal OFDM.....	33
Figura. 2.4. Sistema OFDM detallado.....	35
Figura. 2.5. Símbolo OFDM extendido cíclicamente.....	38
Figura. 2.6. Reflexiones multitrayecto.....	41
Figura. 2.7. a.Símbolo OFDM ideal b.Símbolo OFDM con offset de frecuencia y/o ruido de fase.....	44
Figura. 3.1. Ventana de inicio de MATLAB.....	49
Figura. 3.2. Ventana de inicio de Simulink.....	50
Figura. 3.3. Diagrama de bloques de un sistema OFDM simple.....	51
Figura. 3.4. Bloque de señal de entrada en Simulink.....	52
Figura. 3.5. Transmisor OFDM en Simulink.....	55
Figura. 3.6. Canal dispersivo en Simulink.....	58
Figura. 3.7. Perfil de retardo en Simulink.....	59
Figura. 3.8. Receptor OFDM en Simulink.....	60
Figura. 3.9. Cálculo de errores y presentación de señales.....	62
Figura. 3.10. Duración de la simulación.....	64
Figura. 3.11. Bloque que aparece al ejecutar el archivo SIMULADOR_OFDM.mdl.....	65
Figura. 3.12. Interfaz de usuario gráfica.....	65
Figura. 4.1. Diagrama de bloques del simulador OFDM implementado en Simulink.....	68

Figura. 4.2. Bloques utilizados en Simulink para la modulación y la demodulación.....	70
Figura. 4.3. Bloques en Simulink para implementar el esquema de transmisión 256 OFDM.....	72
Figura. 4.4. Bloque en Simulink para implementar la inserción-remoción del prefijo cíclico.....	73
Figura. 4.5. Bloque en Simulink para cálculo de errores.....	73
Figura. 4.6. BER vs SNR para binarios como señal de entrada.....	77
Figura. 4.7. BER vs SNR para imagen como señal de entrada.....	78
Figura. 4.8. Imagen de entrada original.....	78
Figura. 4.9. Imagen al pasar por SUI-3 con SNR = 0 dB.....	79
Figura. 4.10. Imagen al pasar por SUI-3 con SNR = 5 dB.....	79
Figura. 4.11. Imagen al pasar por SUI-3 con SNR = 10 Db.....	79
Figura. 4.12. Imagen al pasar por SUI-3 con SNR = 15 dB.....	80
Figura. 4.13. Imagen al pasar por SUI-3 con SNR = 20 dB.....	80
Figura. 4.14. BER vs SNR para sonido como señal de entrada.....	81
Figura. 4.15. Señal de audio original.....	81
Figura. 4.16. Señal de audio de entrada cuantizada.....	81
Figura. 4.17. Señal de audio al pasar por SUI-5 con SNR = 0 dB.....	82
Figura. 4.18. Señal de audio al pasar por SUI-5 con SNR = 5 dB.....	82
Figura. 4.19. Señal de audio al pasar por SUI-5 con SNR = 10 dB.....	82
Figura. 4.20. Señal de audio al pasar por SUI-5 con SNR = 15 dB.....	82
Figura. 4.21. Señal de audio al pasar por SUI-5 con SNR = 20 dB.....	83
Figura. 4.22. BER vs SNR para canales SUI-1, SUI-2 y SUI-3.....	84

GLOSARIO

ADSL	Asynchronous Digital Subscriber Line
AMPS	Advanced Mobile Phone System
API	Application Program Interface
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BER	Bit Error Rate
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CDMA	Code Division Multiple Access
DAB	Digital Audio Broadcast
DFT	Discrete Fourier Transform
DVB	Digital Video Broadcast
EM	Electro Magnetic
ETSI	European Telecommunications Standardization Institute
FCC	Federal Communications Commission
FDM	Frequency Division Multiplexing
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FFT	Fast Fourier Transform
FM	Frequency Modulation
GSM	Global System for Mobile Communications
GUI	Graphical User Interface
HDSL	High-bit-rate Digital Subscriber Line
HIPERLAN	High Performance Local Area Network
ICI	Inter Carrier Interference
IMTS	Improved Mobile Telephone Service
ISI	Intersymbol Interference
ITU	International Telecommunications Union
LAN	Local Area Network
LEO	Low Earth Orbit
LMDS	Local Multipoint Distribution Service
LMDS	Local Multipoint Distribution System
LOS	Line of Sight
MEO	Medium Earth Orbit
MMDS	Multichannel Multipoint Distribution Service
NLOS	Non Line of Sight

OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OOB	Out of Band
O-QAM	Orthogonal Quadrature Amplitude Modulation
PAR	Peak to Average Ratio
PBX	Private Branch Exchange
PCS	Personal Communications Systems
PHS	Personal Handyphone System
PLL	Phase Lock Loop
PSTN	Public Switching Telephone Network
PSTN	Public Switching Telephone Network
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
SNR	Signal to Noise Ratio
SOFDMA	Scalable Orthogonal Frequency Division Multiple Access
SUI	Stanford University Interim
TDMA	Time Division Multiple Access
U-NII	Unlicensed National Information Infrastructure
VCO	Voltage-Controlled Oscillator
WLAN	Wireless Local Area Network

CAPITULO 1

INTRODUCCION

1.1 COMUNICACIONES INALAMBRICAS

Las comunicaciones inalámbricas son el segmento de más rápido crecimiento dentro de la industria de las comunicaciones. Entre las principales aplicaciones que la comunicación inalámbrica ha encontrado están los sistemas celulares, los cuales han experimentado un crecimiento exponencial en las últimas décadas. Otra aplicación que va cobrando cada vez más fuerza en el mundo de las comunicaciones es la red de área local inalámbrica, la cual ha llegado a convertirse en un complemento y en algunos casos en un sustituto de a las redes cableadas utilizadas en muchos hogares, negocios y centros de estudio.

El crecimiento explosivo de los sistemas inalámbricos conjuntamente con la proliferación de sistemas computacionales personales, tales como computadoras *laptop* o *palm*s, muestran un futuro brillante para las redes inalámbricas. Sin embargo, muchos retos técnicos aparecen al momento de diseñar redes inalámbricas robustas, debido principalmente a las características del medio de transmisión sobre el cual deben viajar.

1.1.1 Historia de las Comunicaciones Inalámbricas

Las primeras redes inalámbricas fueron desarrolladas en la era pre-industrial. Estos sistemas transmitían información sobre distancias con línea de vista usando herramientas rudimentarias tales como señales de humo, señalización con antorchas, espejos reflejantes o banderas. Estas tempranas redes de comunicación fueron reemplazadas primero por la red telegráfica y luego por el teléfono. En 1895, Marconi mostró al mundo la primera transmisión de radio. Esta tecnología avanzó rápidamente para permitir transmisiones sobre grandes distancias con mejor calidad.

Los primeros sistemas de radio transmitieron señales analógicas. Hoy en día, la mayoría de sistemas de radio transmiten señales digitales compuestas de bits binarios. El último tipo de radio es el llamado radio paquete y se caracteriza por transmisión de paquetes. La primera red basada en radio paquete, ALOHANET, fue desarrollada en la Universidad de Hawai en 1971. La milicia estadounidense estaba extremadamente interesada en la combinación de paquetes de datos y radio *broadcast*¹ e invirtió muchos de sus recursos para desarrollar redes que usen radio paquete para comunicaciones tácticas en el campo de batalla. Las redes de radio paquete también encontraron aplicaciones comerciales al dar soporte a los servicios de datos inalámbricos de área amplia.

La aparición de la tecnología cableada Ethernet en 1970 apartó a muchas compañías comerciales de *networking* basado en radio debido a las altas tasas de datos que se conseguían con esta nueva tecnología. En 1985 la FCC² permitió el desarrollo comercial de LANs inalámbricas al autorizar el uso público de las bandas ISM³ para productos LAN inalámbricos. Las bandas ISM fueron muy atractivas para los vendedores LAN debido a que no debían obtener ningún tipo de licencia para su uso. Sin embargo las primeras LANs inalámbricas tenían un rendimiento muy bajo. La generación actual de LANs inalámbricas, basadas en la familia de los estándares IEEE 802.11, tienen un mejor rendimiento aunque la tasa de datos aún se mantiene relativamente baja en comparación con las tecnologías que utilizan cable como medio de transmisión.

La aplicación más exitosa de *networking* inalámbrico ha sido el sistema de telefonía celular. Las raíces de este sistema empezaron en 1915, cuando se realizó la primera transmisión entre New York y San Francisco. Los primeros sistemas de telefonía celular tenían una capacidad limitada debido al uso ineficiente del espectro y a la tecnología de radio de aquel entonces. Una solución para este problema de capacidad emergió durante los años 50s y 60s cuando los laboratorios Bell AT&T desarrollaron el concepto celular.

El crecimiento explosivo de los sistemas celulares tomó a todos por sorpresa. En un estudio de mercadeo, AT&T predijo que los teléfonos celulares iban a ser utilizados tan

¹ *Broadcast* se refiere a un modo de transmisión en el cual un nodo emisor transmite de manera simultánea a varios nodos receptores.

² Federal Communications Commission. Agencia de los Estados Unidos que regula las comunicaciones interestatales e internacionales.

³ Industrial, Scientific, and Medical. Bandas reservadas para uso no comercial de radiofrecuencia electromagnética.

solo por doctores y por gente adinerada, por lo que abandonó este negocio. Sin embargo, lo retomó años más tarde debido a que el acelerado crecimiento de la telefonía celular la convertía en un negocio muy rentable.

La segunda generación de sistemas celulares, desplegada a inicios de los 90s, estaba basada en comunicaciones digitales. Estos sistemas gradualmente fueron ofreciendo servicios de datos a más de servicios de voz. El gran potencial de mercado de los teléfonos celulares llevó a la creación de varios estándares diferentes para los teléfonos de segunda generación. Mas aún, algunos países iniciaron servicios para sistemas de tercera generación, los cuales también sufrían de incompatibilidad debido a la existencia de varios estándares. Sin embargo, los teléfonos celulares actuales vienen incorporados con características que les permiten trabajar con varios estándares.

Otro tipo de comunicación inalámbrica es la ofrecida por los satélites. Los satélites están caracterizados por la altura en la que se encuentra su órbita, por lo que pueden ser de órbita baja, de órbita media y de órbita geoestacionaria. Estos últimos cubren grandes áreas usando muy pocos satélites. Sin embargo, se necesita de mucha potencia para poder alcanzarlos y el retardo introducido en la comunicación es muy grande. Debido a estas desventajas presentes en los satélites geoestacionarios, los satélites de órbita menor comenzaron a ser más utilizados.

El objetivo primordial de la utilización de los sistemas satelitales era ofrecer servicios de voz y datos que puedan ser competitivos con los sistemas celulares. Sin embargo, los sistemas satelitales encontraron su mejor aplicación en la transmisión de entretenimiento. Los sistemas satelitales empleados para la transmisión de entretenimiento son la principal competencia de la televisión por cable.

En la actualidad es posible apreciar como las tecnologías inalámbricas están convergiendo para permitir a las personas acceder con un solo dispositivo a servicios de voz, acceso a Internet, navegación en la red, mensajería corta, transferencia de archivos, entretenimiento, control y monitoreo de sistemas, entre otros. Esto demuestra la gran

importancia que tendrán las comunicaciones inalámbricas en un futuro y el gran impacto que producirán en la sociedad.

1.1.2 Sistemas Inalámbricos Actuales

- **Sistemas de telefonía celular**

La telefonía celular es extremadamente popular y lucrativa a nivel mundial. Provee una comunicación de voz y de datos de dos vías con una cobertura regional, nacional o internacional.

La característica que hizo que los sistemas celulares hayan tenido tal impacto es la reutilización de las frecuencias. Esta reutilización de frecuencias explota el concepto de atenuación de potencia de la señal con respecto a la distancia. Para aplicar este concepto, el área de cobertura de un sistema celular es dividida en celdas, cada una de las cuales tiene un conjunto de canales asignados.

Al inicio, se utilizaban estaciones base que transmitían a grandes potencias y estaban ubicadas en locaciones elevadas. Con esto se lograba cubrir un área grande con tan solo una estación base. Actualmente, los sistemas celulares en áreas urbanas usan estaciones base que cubren un área menor y transmiten a una potencia menor. Este cambio a estaciones base que cubren celdas más pequeñas se debió a la necesidad de una mayor capacidad en áreas con una densidad alta de usuarios y al tamaño y costo de la electrónica de las estaciones base. Sin embargo, este cambio a celdas más pequeñas creó nuevos desafíos de diseño. Por ejemplo, los usuarios móviles cambian de una celda de cobertura a otra de manera más rápida, por lo que el intercambio del servicio de una estación base a otra debe ser más rápido. Además, la administración de la red se complica debido a que existe un mayor número de celdas dentro de un área determinada. También es mucho más difícil diseñar modelos de propagación para celdas pequeñas, debido a que esta variación depende altamente de la ubicación de la estación base y los diferentes reflectores que se encuentren a su alrededor.

La primera generación de sistemas celulares, llamada en Estados Unidos AMPS ⁴, empleaba comunicaciones analógicas. La mayoría de los sistemas de primera generación Europeos eran incompatibles entre ellos, por lo que, para la segunda generación, convergieron a un estándar uniforme llamado GSM. En Estados Unidos se crearon varios estándares para los sistemas de segunda generación. Dos de estos son el IS-54 y el IS-95. El primero usa una combinación de TDMA y FDMA mientras que el segundo utiliza CDMA. El espectro para la comunicación celular en la banda de frecuencia de los 2 GHz fue subastado, por lo que los proveedores de servicios podían utilizar un estándar existente o desarrollar uno nuevo para esta porción del espectro. El resultado final fue la existencia de tres estándares para esta banda de frecuencias: el IS-136, IS-95 y GSM. Todos estos estándares fueron mejorados para poder soportar altas tasas de paquetes de datos. La tercera generación de sistemas celulares está basada en el estándar de CDMA de banda ancha desarrollado bajo el auspicio de la ITU⁵. La tercera generación es incompatible con la segunda generación, por lo que los proveedores deben invertir en nueva infraestructura antes de poder proveer el servicio de tercera generación. Ya se habla de la existencia de la cuarta generación, la cual se dice será la red de redes y el sistema de sistemas basado totalmente en IP. La cuarta generación se alcanzará después de la convergencia de redes cableadas, de redes inalámbricas y de una variedad de equipos electrónicos, tales como teléfonos celulares, computadoras portátiles, sistemas de posicionamiento global, entre otros.

- **Teléfonos inalámbricos**

Los teléfonos inalámbricos aparecieron en los años 70 y han experimentado un crecimiento espectacular desde entonces. Fueron originalmente diseñados para proveer una conexión inalámbrica de bajo costo y baja movilidad a la PSTN⁶. Inicialmente tenían una calidad de voz muy baja. En Europa y en Asia la segunda generación de teléfonos inalámbricos digitales ha extendido el rango de uso más allá de una única residencia u oficina. Para ello se necesitan colocar estaciones en lugares donde la gente se congrega. Sin embargo, este sistema no soporta el cambio entre estaciones base cuando el usuario está en movimiento.

⁴ Advanced Mobile Phone System.

⁵ International Telecommunication Union. Organización internacional creada para estandarizar las telecomunicaciones y la radio.

⁶ Public Switched Telephone Network

Otra evolución para los teléfonos inalámbricos es el sistema europeo DECT⁷. A diferencia de otros sistemas, este sistema provee una movilidad local limitada. Un sistema más avanzado de telefonía inalámbrica es el sistema PHS⁸, el cual es muy similar al sistema celular.

- **Redes de área local inalámbricas**

Las LAN inalámbricas proveen una alta velocidad de datos dentro de una región pequeña. Los dispositivos que accedan a estas LAN son típicamente estacionarios o se mueven a velocidades bajas. Todas las LAN inalámbricas en Estados Unidos operan en bandas de frecuencias no licenciadas. Las principales bandas no licenciadas son las bandas ISM de 900 MHz, 2.4 GHz y 5.8 GHz y la banda U-NII⁹ de 5 GHz. Las LANs inalámbricas pueden tener una arquitectura tanto en estrella como de punto a punto.

La primera generación de LANs inalámbricas estaba basada en protocolos propietarios e incompatibles. La mayoría de estos operaban en la banda ISM de los 900 MHz y usaban espectro esparcido de secuencia directa, con tasas de datos en el orden de 1 a 2 Mbps. La falta de estandarización y los altos costos de los productos hicieron que esta primera generación fracasase. La segunda generación de LANs inalámbricas en los Estados Unidos operaba en la banda ISM de 2.4 GHz. Un estándar para esta banda de frecuencia, el estándar IEEE 802.11b, fue desarrollado para evitar algunos de los problemas de la primera generación. Este estándar especificaba la utilización de espectro esparcido de secuencia directa con tasas de datos alrededor de 1.6 Mbps.

Dentro de la familia 802.11 se desarrollaron dos estándares adicionales: 802.11a y 802.11g. El primero opera en la banda de los 5 GHz. Esta basado en modulación multiportadora y ofrece tasas de datos desde 20 a 70 Mbps. El segundo estándar también utiliza modulación multiportadora y puede ser usado tanto en la banda de los 2.4 GHz así como en la banda de los 5 GHz con velocidades de hasta 54 Mbps.

⁷ Digital Enhanced Cordless Telecommunications. Estándar ETSI para teléfonos portátiles usados en casa y oficinas.

⁸ Personal Handy-Phone System. Sistema de red móvil usado en Japón, China y Taiwán.

⁹ Unlicensed National Information Infrastructure

En Europa los estándares de comunicación LAN inalámbrica se denominan HIPERLAN. El primer estándar HIPERLAN, el HIPERLAN Tipo 1, es similar al estándar IEEE 802.11a. El estándar HIPERLAN Tipo 2, provee tasas de datos en el orden de los 54 Mbps y también soporta acceso a redes celulares, ATM e IP.

- **Servicios de datos inalámbricos de área amplia**

Estos servicios proveen datos inalámbricos a usuarios que requieren de alta movilidad sobre grandes áreas de cobertura. En estos sistemas una determinada región geográfica es cubierta por estaciones base montadas en torres, techos o montañas. Estas estaciones base pueden estar conectadas al backbone de una red cableada.

Los primeros servicios de datos inalámbricos de área amplia tenían una tasa de datos menor a 10 Kbps, la cual se ha incrementado gradualmente hasta llegar a los 20 Kbps. Dos son las principales compañías proveedoras de este servicio: Motient y Bell South Mobile Data. Metricom provee un servicio similar. Estos servicios no han tenido mucho éxito debido a la aparición de nuevas generaciones de sistemas celulares.

- **Acceso inalámbrico de banda ancha**

El acceso inalámbrico de banda ancha provee comunicaciones inalámbricas de altas tasas de transmisión entre un punto de acceso fijo y terminales múltiples. Este sistema fue propuesto para soportar servicios de video en el hogar, pero luego se orientó a proveer datos de alta velocidad para Internet, www¹⁰ y redes de datos para hogares y negocios.

WiMAX es una tecnología inalámbrica de banda ancha emergente que está basada en el estándar IEEE 802.16. Este estándar trabaja en la banda entre los 10 GHz hasta los 66 GHz y solo tiene capacidades para propagación con LOS¹¹. El estándar 802.16a fue una enmienda del 802.16. Trabaja en la banda de 2 GHz a 11 GHz con OFDM, por lo que tiene capacidades de trabajar con transmisiones NLOS¹² y fue pensado para ofrecer acceso de última milla a servicios inalámbricos fijos de banda ancha. Luego de algún tiempo se comenzó a trabajar en el estándar conocido como 802.16-2004, el cual ofrecería

¹⁰ World Wide Web. Sistema de documentos de hipertexto entrelazados accedidos vía Internet.

¹¹ Line of Sight. Tipo de propagación en la cual la radiación electromagnética viaja en una línea recta.

¹² Non Line of Sight. Transmisión a través de un camino que está parcialmente obstruido.

transmisiones fijas NLOS. Este estándar utiliza 256 subportadoras OFDM y alcanza velocidades de hasta 75 Mbps. Finalmente se desarrolló el estándar 802.16e-2005, el cual proveería servicios de acceso inalámbrico tanto fijos como móviles. Este estándar trabaja en la banda de frecuencias entre 2 GHz hasta 11 GHz, utiliza hasta 2048 subportadoras con acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal escalable (SOFDMA) y alcanza velocidades de hasta 75 Mbps.

Tabla. 1.1. Características de los estándares 802.16

	802.16	802.16-2004	802.16e-2005
Banda de frecuencias	10GHz–66GHz	2GHz–11GHz	2GHz–11GHz
Aplicación	LOS Fija	NLOS Fija	NLOS Fija y móvil
Tasa de transmisión	32Mbps–134.4Mbps	1Mbps–75Mbps	1Mbps–75Mbps
Esquema de transmisión	Portadora Simple	Portadora simple, OFDM	Portadora simple, OFDM, OFDMA
Implementación WiMAX	N/A	WiMAX Fijo	WiMAX Móvil
Tamaño de FFT	N/A	256	256 OFDM, hasta 2048 OFDMA
Longitud prefijo cíclico	N/A	1/32, 1/16, 1/8, 1/4 ¹³	

Muchas veces los términos WiMAX fijo, WiMAX móvil, 802.16d y 802.16e son confundidos y usados de manera incorrecta. Estrictamente hablando, el estándar 802.16d nunca ha existido. Su verdadero nombre es 802.16-2004. Lo mismo ocurre con el estándar 802.16e. Su correcta denominación es 802.16-e2005. En el caso de la denominación de WiMAX fijo, esta se refiere a los sistemas que han sido construidos usando el estándar 802.16-2004 como su tecnología de interfaz de aire. Por otro lado, el nombre WiMAX móvil se refiere a los sistemas que han sido construidos utilizando el estándar 802.16e-2005 como su tecnología de interfaz de aire.

- **Sistemas de *paging***

Estos sistemas transmiten simultáneamente con alta potencia un pequeño mensaje desde muchas estaciones base o desde satélites. No se necesita ningún tipo de enrutamiento debido a que el mensaje es transmitido por *broadcast*. La gran complejidad de los

¹³ El rango de variación de la longitud del prefijo cíclico permite a los diseñadores hacer intercambios apropiados entre la eficiencia espectral del sistema y la robustez para combatir el esparcimiento de retardo.

transmisores de este sistema permite tener receptores de baja complejidad, lo que representa al usuario final un costo menor.

Al principio, los sistemas *paging* fueron muy populares. Sin embargo, esto cambió debido al costo competitivo de los teléfonos celulares. Ante esto, los equipos de *paging* fueron dotados con nuevas características, como por ejemplo la capacidad de no solo recibir información sino también transmitirla. A pesar de estas innovaciones, el mercado para estos sistemas ha caído abruptamente, aunque siempre será un sistema atractivo para los doctores y otros profesionales que deben ser alcanzados en cualquier lugar.

- **Redes satelitales**

Los sistemas satelitales comerciales son otro componente importante en la infraestructura de las comunicaciones inalámbricas. Existen algunas dificultades al momento de proveer servicios de voz y datos con satélites geoestacionarios debido a que se requiere una gran cantidad de potencia para alcanzarlos y el retardo producido por estos sistemas es considerable. Los satélites de órbita baja fueron pensados como una mejor solución al momento de brindar servicios de voz y datos. En la actualidad, el uso más popular que se les da a los sistemas satelitales es la transmisión de video y audio sobre áreas geográficas grandes.

- **Radios de baja-potencia bajo-costo: Bluetooth y Zigbee**

A medida que el costo y el consumo de potencia de los radios decrecen, es más factible incorporarlos en una variedad de equipos electrónicos, los cuales pueden ser usados por ejemplo para crear hogares inteligentes, sensores de red, y otras clases de aplicaciones. Dos tecnologías de radio han emergido para soportar esta tendencia: Bluetooth y Zigbee.

Bluetooth provee conexiones de rango corto entre dispositivos inalámbricos con capacidades de red rudimentarias. Está basado en la incorporación en dispositivos digitales de un microchip diminuto que funciona como radio transceptor. Su rango normal de operación es de 10 m con una potencia de transmisión de 1 mW y este rango puede ser incrementado hasta 100 m al elevar la potencia de transmisión a 100 mW. Este estándar provee un canal de datos asíncrono de 723.2 Kbps. En este modo, existe un canal reverso

con una tasa de datos de 57.6 Kbps. También permite hasta tres canales sincrónicos, cada uno de 64 Kbps. Opera en la banda de los 2.4 GHz

ZigBee está diseñado para un menor consumo de potencia y costo comparado con Bluetooth. Esta basado en el estándar IEEE 805.15.4. Opera en la misma banda que Bluetooth y es capaz de conectar 255 equipos por red. Soporta tasas de datos de hasta 250 Kbps en un rango de 30 m. El objetivo de ZigBee es proporcionar operación de radio por meses o años sin la necesidad de una recarga de batería.

- **Radios de banda ultra ancha**

Este tipo de radios tiene tasas de datos potencialmente altas. El concepto de comunicaciones de banda ultra ancha se originó con un transmisor de Marconi, el cual ocupaba un gran ancho de banda. Sin embargo, debido a la aparición de tecnologías que usan el espectro de frecuencias de manera cada vez más eficiente, se perdió el interés en este tipo de radios. El renovado interés en este tipo de dispositivos fue incitado por la decisión de la FCC en el 2002 de permitir la operación de dispositivos de banda ultra ancha como sistemas que se encuentran bajo los usuarios del rango de frecuencias de los 7 GHz.

Este tipo de radios posee ventajas únicas que han sido largamente apreciadas por las comunidades de radar y de comunicaciones en general. Su naturaleza de banda ancha permite a estas señales penetrar a través de obstáculos y proveer capacidades de variación muy precisas. Además, tiene el potencial de permitir tasas de datos muy altas.

1.1.3 El Espectro Inalámbrico

La mayoría de países tienen agencias gubernamentales encargadas de la regulación y administración de las políticas en el ámbito de las telecomunicaciones, incluyendo el manejo del espectro radioeléctrico. En el Ecuador, las instituciones encargadas de esta actividad son el Consejo Nacional de Telecomunicaciones (CONATEL) y el Consejo Nacional de Radiodifusión y Televisión (CONARTEL). Este último, se encarga de regular, otorgar y autorizar los medios, sistemas y servicios de radiodifusión y televisión en todo el territorio nacional.

En el caso de las comunicaciones inalámbricas, se han designado bandas de frecuencias a cada uno de los distintos servicios inalámbricos. Estas bandas de frecuencias son tanto bandas licenciadas como bandas no licenciadas¹⁴.

Tabla. 1.2. Servicios inalámbricos en bandas de frecuencias licenciadas

SERVICIO	FRECUENCIAS
Radio AM	535 – 1605 KHz
Radio FM	88 – 108 MHz
Broadcast de Televisión (Canales 2-6)	54 – 88 MHz
Broadcast de Televisión (Canales 7-13)	174 – 216 MHz
Broadcast de Televisión (UHF)	470 – 806MHz
Inalámbrico de Banda Ancha de 3G	746 – 764 MHz, 776 – 794 MHz
Inalámbrico de Banda Ancha de 3G	1.7 – 1.85 MHz, 2.5 – 2.69 MHz
Teléfonos Celulares Digitales de 1G y 2G	806 – 902 MHz
Servicio de Comunicaciones Personales (Teléfonos celulares de 2G)	1.85 – 1.99 GHz
Servicio de Comunicaciones Inalámbricos	2.305 – 2.32 GHz, 2.345 – 2.36 GHz
Radio Digital Satelital	2.32 – 2.325 GHz
MMDS ¹⁵	2.15 – 2.68 GHz
Satélite de <i>Broadcast</i> Digital (Televisión Satelital)	12.2 – 12.7 GHz
LMDS ¹⁶	27.5 – 29.5 GHz, 31 – 31.3 GHz
Servicios Inalámbricos Fijos	38.6 – 40 GHz

Tabla. 1.3. Servicios inalámbricos en bandas de frecuencias no licenciadas

SERVICIO	FRECUENCIAS
Banda ISM I (Teléfonos inalámbricos, WLANs 1G)	902 – 928 MHz
Banda ISM II (Bluetooth, WLANs 802.11b)	2.4 – 2.4835 GHz
Banda ISM III (PBX inalámbricas)	5.725 – 5.85 GHz
Banda NII I (Sistemas interiores, WLANs 802.11a)	5.15 – 5.25 GHz
Banda NII II (aplicaciones exteriores y de campus)	5.25 – 5.35 GHz
Banda NII III (enlaces exteriores grandes y punto a punto)	5.725 – 5.825 GHz

¹⁴ Bandas licenciadas. Son asignadas por cuerpos regulatorios a operadores específicos. Bandas no licenciadas. Pueden ser usadas por cualquier sistema sujeto a ciertos requerimientos operacionales.

¹⁵ Multichannel Multipoint Distribution Service. Tecnología inalámbrica usada para networking de banda ancha.

¹⁶ Local Multipoint Distribution Service. Tecnología de acceso inalámbrico de banda ancha.

1.2 CARACTERISTICAS DE LOS CANALES INALAMBRICOS

El canal inalámbrico es un medio de comunicación impredecible y difícil. En primer lugar, el espectro radioeléctrico sobre el cual se encuentran las comunicaciones inalámbricas es un recurso escaso, el cual es utilizado por muchas aplicaciones y sistemas. Es por esto que el espectro es controlado por organismos regulatorios regionales y globales. Otra razón por la cual el canal inalámbrico es considerado un medio difícil, y la razón que más desafíos técnicos presenta al momento de trabajar con este canal, es el efecto de degradación que produce este medio sobre las señales transmitidas sobre el mismo. Una señal recibida que ha viajado a través de un canal inalámbrico es una combinación de réplicas atenuadas, reflejadas, refractadas y difractadas de la señal original. Además de esto, el canal añade a la señal el clásico AWGN¹⁷.

Una de las características más importantes que debe ser considerada en el estudio de los canales inalámbricos es el efecto de desvanecimiento que afecta a las señales que viajan por este medio. Además, la comprensión de dichas manifestaciones será de gran utilidad en el momento de definir el tipo de canal que va a ser modelado en el presente trabajo, el canal dispersivo. A continuación se presentan las manifestaciones del canal desvanecedor de acuerdo a la Figura. 1.1., lo cual permitirá posteriormente un mejor entendimiento en el momento de definir las características de un canal dispersivo.

¹⁷ Additive White Gaussian Noise. Modelo de canal que añade a la señal ruido blanco con una densidad espectral de potencia constante y una amplitud de distribución Gaussiana.

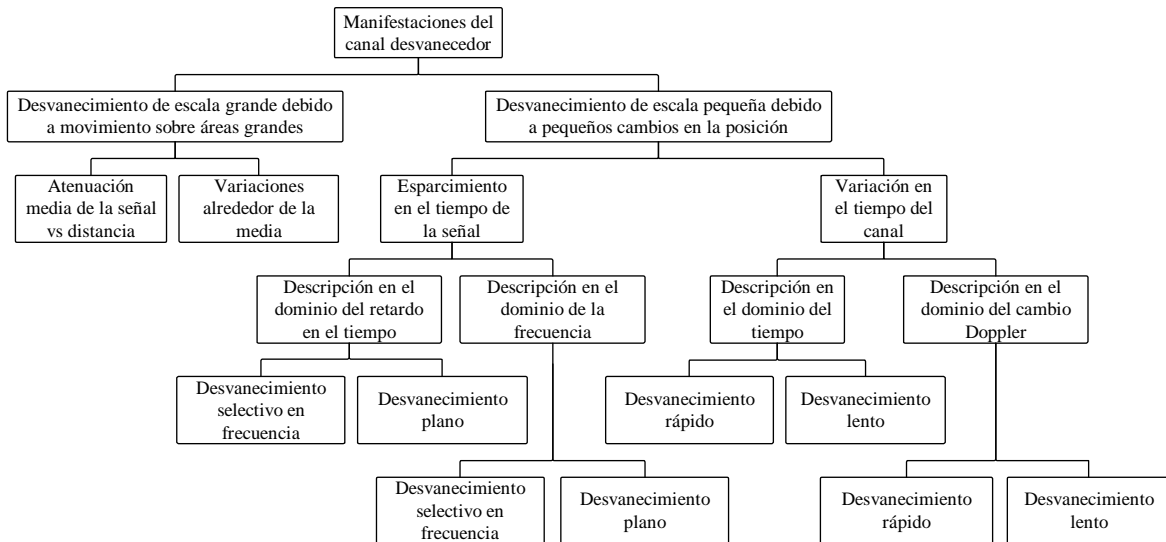


Figura. 1.1. Manifestaciones de los canales desvanecedores¹⁸

1.2.1 Desvanecimiento de Escala Grande

Se refiere al desvanecimiento de la señal debido al movimiento sobre áreas grandes. Está representado por la siguiente ecuación:

$$L_p(d)(dB) = L_s(d_0)(dB) + 10n \log_{10}(d/d_0) + X_\sigma(dB) \quad (1.1)$$

, donde:

- $L_s(d_0)$ es la función de pérdida en el trayecto o también llamada pérdida en el espacio libre, la cual es igual a $L_s(d_0) = \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right)^2$
- d_0 corresponde a un punto localizado en el campo lejano de la antena de transmisión. Típicamente, el valor de d_0 es de 1 Km para celdas grandes, 100 m para microceldas y 1 m para canales interiores.
- d es la distancia entre el transmisor y el receptor.
- n depende de la frecuencia, la altura de la antena y el ambiente de propagación. En el espacio libre n es igual a 2. En presencia de un fenómeno de onda guiada muy fuerte n puede ser menor que 2. Cuando existen obstrucciones n es mayor.
- X_σ denota una variable aleatoria Gaussiana de media cero y desviación estándar σ .

¹⁸ Manifestaciones del canal desvanecedor según Sklar, Bernard, Digital Communications: Fundamentals and Applications

Si es que la antena se encuentra en una trayectoria limitada, se puede asumir que el efecto de desvanecimiento de escala grande es constante.

1.2.2 Desvanecimiento de Escala Pequeña

Este desvanecimiento se presenta debido a pequeños cambios en la posición de la antena receptora. Los mecanismos mediante los cuales el desvanecimiento de escala pequeña se manifiesta son el esparcimiento en el tiempo de los pulsos digitales dentro de la señal (dispersión de la señal) y un comportamiento variante en el tiempo del canal debido al movimiento.

- **Esparcimiento en el tiempo de la señal en el dominio del tiempo**

Para un impulso transmitido simple, el tiempo entre la primera componente de la señal recibida y la última se denomina esparcimiento de retardo T_m . La relación de la potencia esperada con respecto al tiempo de retardo de una señal se denomina perfil de retardo.

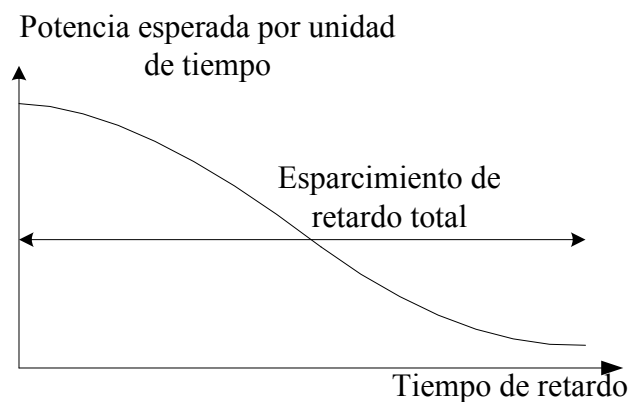


Figura. 1.2. Perfil de retardo

La relación entre el máximo tiempo de esparcimiento de retardo, T_m , y el tiempo de símbolo, T_s , puede ser vista en términos de dos diferentes categorías de degradación: desvanecimiento selectivo en frecuencia y desvanecimiento no selectivo en frecuencia o plano.

Un canal exhibe desvanecimiento selectivo en frecuencia si el tiempo de esparcimiento de retardo es mayor que el tiempo de símbolo, $T_m > T_s$. Esta condición ocurre cuando las componentes multitrayecto recibidas de un símbolo se extienden más allá de la duración en tiempo del símbolo. Tal dispersión multitrayecto de la señal lleva a la misma clase de distorsión intersimbólica (ISI) causada por un filtro electrónico. De hecho, otro nombre para esta categoría de desvanecimiento es ISI inducido en el canal.

Se dice que un canal exhibe desvanecimiento no selectivo en frecuencia o plano si el tiempo de esparcimiento de retardo es menor que el tiempo de símbolo, $T_m < T_s$. En este caso, todos los componentes multitrayecto recibidos de un símbolo arriban dentro de la duración en tiempo de dicho símbolo.

- **Esparcimiento en el tiempo de la señal en el dominio de la frecuencia**

El ancho de banda coherente, f_0 , es una medida estadística del rango de frecuencias sobre el cual el canal hace pasar a todos los componentes espectrales de la señal con aproximadamente igual ganancia y fase lineal. Como una aproximación, es posible decir que el ancho de banda coherente de una señal es aproximadamente igual al inverso del esparcimiento de retardo, $f_0 \approx 1/T_m$. De manera análoga al análisis realizado en el esparcimiento en el tiempo de la señal en el dominio del tiempo, la relación entre el ancho de banda coherente, f_0 , y el ancho de banda de la señal, W , el cual es aproximadamente igual al inverso del tiempo de símbolo, $W \approx 1/T_s$, da lugar a los desvanecimientos selectivos en frecuencia y a los no selectivos en frecuencia o planos.

Un canal es llamado selectivo en frecuencia si el ancho de banda coherente es menor que el ancho de banda de la señal, $f_0 < W$. Este desvanecimiento ocurre cuando no todas las componentes espectrales de una señal son afectadas de igual manera por el canal.

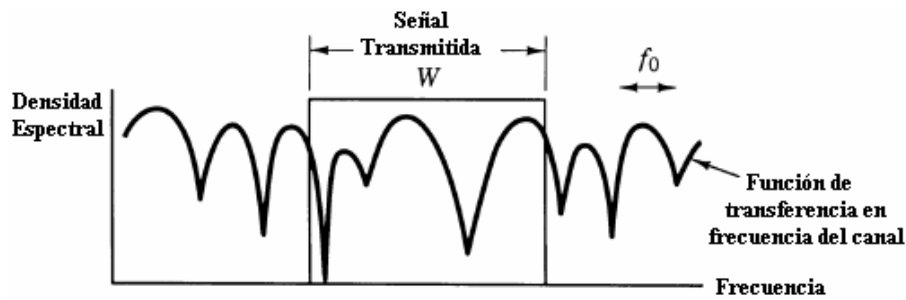


Figura. 1.3. Caso de desvanecimiento selectivo en frecuencia $f_0 < W$

La degradación por desvanecimiento plano o no selectivo en frecuencia ocurre cuando el ancho de banda coherente es mayor que el ancho de banda de la señal $f_0 > W$. Esto quiere decir que todas las componentes espectrales de la señal serán afectadas por el canal en manera similar.

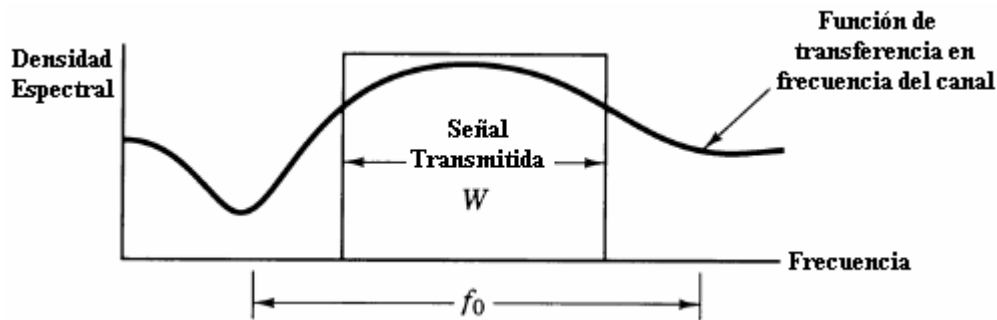


Figura. 1.4. Caso de desvanecimiento no selectivo en frecuencia $f_0 > W$

- **Variación en el tiempo del canal visto en el dominio del tiempo**

El esparcimiento de retardo y el ancho de banda coherente caracterizan las propiedades de esparcimiento en el tiempo del canal en áreas locales. Sin embargo, no ofrecen información acerca de la naturaleza variante en el tiempo debido al movimiento relativo entre el transmisor y el receptor. El tiempo coherente, T_0 , es una medida utilizada para caracterizar la naturaleza variante en el tiempo del canal y representa el tiempo en el cual la respuesta del canal es esencialmente invariante. Es importante destacar que las manifestaciones de desvanecimiento básicas, esparcimiento en el tiempo de la señal y variación en el tiempo del canal, pueden ser consideradas como procesos independientes, por lo cual pueden ser analizados de manera individual. La naturaleza variante en el tiempo o el mecanismo de rapidez de desvanecimiento del canal puede ser clasificado en dos categorías: desvanecimiento rápido y desvanecimiento lento.

El término desvanecimiento rápido es usado para describir canales en los cuales el tiempo coherente es menor que el tiempo de duración de símbolo, $T_0 < T_s$. El desvanecimiento rápido describe una condición en la cual el tiempo de duración en el que el canal se comporta de una manera correlacionada es corto comparado con el tiempo de duración del símbolo. Por lo tanto, puede ser esperado que el carácter desvanecedor del canal cambie muchas veces durante el tiempo de un símbolo.

Un canal es generalmente llamado como introductor de desvanecimiento lento si el tiempo coherente del canal es mayor que el tiempo de símbolo, $T_0 > T_s$. Aquí la duración del tiempo en el cual el canal se comporta de una manera correlacionada es grande comparada con el tiempo de duración de un símbolo transmitido. Por esto, se puede esperar que el estado del canal permanezca virtualmente invariante durante el tiempo en el cual un símbolo es transmitido. El símbolo propagado en sí no sufrirá ninguna distorsión. La degradación primaria en un canal desvanecedor lento, como en un canal desvanecedor plano, es pérdida de SNR¹⁹.

- **Variación en el tiempo del canal visto en el dominio de la frecuencia**

El ancho del espectro de potencia Doppler, denotado como f_d , tiene varios nombres: dispersión Doppler, tasa de desvanecimiento, ancho de banda de desvanecimiento o ensanchamiento espectral. Se puede decir que el esparcimiento Doppler, f_d , y el tiempo coherente, T_0 , tienen una relación inversamente proporcional, esto es: $T_0 \approx 1/f_d$. Al igual que en el análisis de la variación en el tiempo del canal en el dominio del tiempo, la relación entre el esparcimiento Doppler y el ancho de banda de la señal da como resultado los dos tipos de desvanecimiento mencionados anteriormente: desvanecimiento rápido y desvanecimiento lento.

Se dice que un canal es desvanecedor rápido si el ancho de banda es menor que el esparcimiento Doppler, $W < f_d$. Por otro lado, un canal es considerado desvanecedor lento si el ancho de banda de la señal es mayor que el esparcimiento Doppler, $W > f_d$.

¹⁹ Signal to noise ratio. Razón entre la potencia de la señal y la potencia del ruido que corrompe a la misma.

Para evitar la distorsión de la señal causada por el desvanecimiento rápido, se debe asegurar que el ancho de banda de la señal sea mayor que el esparcimiento Doppler.

Tanto el esparcimiento de la señal como la variación del canal limitan la tasa de transmisión de la señal. El ancho de banda coherente del canal, f_0 , pone un límite superior a la tasa de la señal que puede ser utilizada sin que se produzca distorsión selectiva en frecuencia. Similarmente, el esparcimiento Doppler del canal, f_d , pone un límite inferior a la tasa de la señal que puede ser utilizada sin que se sufra distorsión por desvanecimiento rápido.

1.2.3 Modelos de Canales Inalámbrico

El modelamiento del canal de transmisión sobre el cual trabajan las tecnologías inalámbricas ha sido uno de las principales dificultades al momento de simular estos sistemas. Esto debido principalmente a que las variables que definen un canal inalámbrico varían en un rango muy amplio dependiendo de la arquitectura física del medio ambiente. A pesar de esto, se han logrado definir modelos de canales inalámbricos cuyo comportamiento tiene bastante similitud al encontrado en la práctica. A continuación se presentan dos definiciones de modelo de canal inalámbrico.

- **Canales COST 207**

El proyecto COST 207 propone varios modelos de canal inalámbrico que dependen del tipo de ambiente en el que se está realizando la transmisión. Los canales COST 207 asocian una determinada función de perfil de retardo a cada uno de los diferentes tipos de ambiente que se pueden encontrar. Es importante hacer notar que al definir la función de perfil de retardo, implícitamente se están definiendo las potencias asociadas a cada uno de los tiempos de retardo.

Tabla. 1.4. Modelos de perfil de retardo propuestos por el proyecto COST 207

TIPO DE AMBIENTE	FUNCIÓN DE PERFIL DE RETARDO	
Urbano sin colinas	$\exp(-\tau/1\mu\text{s})$	
Rural sin colinas	$\exp(-9.2 \tau/1\mu\text{s})$	
Urbano malo con colinas	$\exp(-\tau/1\mu\text{s})$	para $0 < \tau < 5\mu\text{s}$
	$0.5 \exp(5-\tau/1\mu\text{s})$	para $5 < \tau < 10\mu\text{s}$
Colinas	$\exp(-3.5 \tau/1\mu\text{s})$	para $0 < \tau < 2\mu\text{s}$
	$0.1 \exp(15-\tau/1\mu\text{s})$	para $15 < \tau < 20\mu\text{s}$

Las expresiones presentadas para definir el modelo de perfil de retardo tan solo representan el comportamiento de la curva del perfil. Un factor de corrección es necesario para asegurar que la integral sobre todo τ sea igual a la unidad o que represente la potencia media local total.

- **Canales SUI²⁰**

La Universidad de Stanford desarrolló un conjunto de modelos de canales inalámbricos que definen las potencias asociadas a una línea de retardo de tres *taps*²¹. Tanto el valor de la potencia como su retardo asociado dependen de parámetros tales como el factor K, el cual es la razón entre la potencia de la componente de la señal fija y la potencia de la componente de la señal variable, la frecuencia Doppler, el tipo de terreno, las características del sistema de transmisión, entre otros. Los canales SUI han sido usados para el diseño, desarrollo y validación de las tecnologías asociadas a las aplicaciones inalámbricas fijas de banda ancha en la banda MMDS. Son seis los canales SUI que se definen y se aplican a tres tipos de terreno:

- Terreno tipo A: Colinas pequeñas con moderada-alta densidad de árboles
- Terreno tipo B: Colinas grandes con baja densidad de árboles, o plano con moderada-alta densidad de árboles.
- Terreno tipo C: Plano con baja densidad de árboles

Como se mencionó anteriormente, los parámetros definidos en los canales SUI dependen de varios factores, entre ellos las características del escenario en el que se

²⁰ Stanford University Interim.

²¹ Tap es un término usado en el diseño de filtros FIR para denotar un término de la ecuación diferencial.

desarrolla la comunicación. A continuación se presentará los valores de los parámetros de los canales SUI para los siguientes escenarios:

Escenario 1

- Tamaño de celda: 6.4 Km
- Altura de la antena BTS: 15.24 m
- Altura de la antena CPE: 3.05 m
- Ancho del rayo de la antena BTS: 120°
- Ancho del rayo de la antena CPE: 50°
- Polarización: vertical

Escenario 2

- Tamaño de celda: 7 Km
- Altura de la antena BTS: 30 m
- Altura de la antena CPE: 6 m
- Ancho del rayo de la antena BTS: 120°
- Ancho del rayo de la antena CPE: 360° (omnidireccional)
- Polarización: vertical

Tabla. 1.5. Canales SUI – 1 a SUI – 3 Escenario 1

	SUI – 1			SUI – 2			SUI – 3		
	Tap1	Tap2	Tap3	Tap1	Tap2	Tap3	Tap1	Tap2	Tap3
Retardo [us]	0	0.2	0.4	0	0.3	0.6	0	0.5	1
Potencia [dB]	0	-3	-10	0	-3	-8	0	-5	-10
Terreno	Tipo C			Tipo C			Tipo B		

Tabla. 1.6. Canales SUI – 4 a SUI – 6 Escenario 1

	SUI – 4			SUI – 5			SUI – 6		
	Tap1	Tap2	Tap3	Tap1	Tap2	Tap3	Tap1	Tap2	Tap3
Retardo [us]	0	2	4	0	4	11	0	14	20
Potencia [dB]	0	-4	-8	0	-3	-5	0	-10	-12
Terreno	Tipo B			Tipo A			Tipo A		

Tabla. 1.7. Canales SUI – 1 a SUI – 3 Escenario 2

	SUI – 1			SUI – 2			SUI – 3		
	Tap1	Tap2	Tap3	Tap1	Tap2	Tap3	Tap1	Tap2	Tap3
Retardo [us]	0	0.4	0.9	0	0.4	1.1	0	0.4	0.9
Potencia [dB]	0	-15	-20	0	-12	-15	0	-5	-10
Terreno	Tipo C			Tipo C			Tipo B		

Tabla. 1.8. Canales SUI – 4 a SUI – 6 Escenario 2

	SUI – 4			SUI – 5			SUI – 6		
	Tap1	Tap2	Tap3	Tap1	Tap2	Tap3	Tap1	Tap2	Tap3
Retardo [us]	0	1.5	4	0	4	10	0	14	20
Potencia [dB]	0	-4	-8	0	-5	-10	0	-10	-14
Terreno	Tipo B			Tipo A			Tipo A		

1.2.4 El Canal Dispersivo

De los dos tipos de desvanecimientos presentados en las secciones anteriores, desvanecimiento de escala grande y de escala pequeña, un canal dispersivo se encuentra dentro de la categoría de desvanecimiento de escala pequeña. Como consecuencia, los efectos del desvanecimiento de escala grande son considerados como una constante. Esto es cierto siempre y cuando la comunicación se realice dentro de un área limitada.

Dentro del desvanecimiento de escala pequeña existen dos mecanismos que producen este tipo de fenómeno: esparcimiento de la señal debido al multitrayecto y variación del canal debido al movimiento. De estos dos mecanismos, el canal dispersivo se encuentra dentro de la categoría de esparcimiento de la señal debido al multitrayecto. Esto implica que el canal dispersivo presenta un desvanecimiento lento o, en otras palabras, el receptor no se encuentra en movimiento. Además, es importante hacer notar que es posible modelar un mecanismo de desvanecimiento de escala pequeña sin considerar el otro debido a que las manifestaciones de desvanecimiento básicas de dispersión de la señal y rapidez de desvanecimiento pueden ser consideradas como independientes entre ellas.

Existen además dos categorías dentro del mecanismo de desvanecimiento debido al esparcimiento de la señal por multitrayecto: desvanecimiento selectivo en frecuencia y desvanecimiento no selectivo en frecuencia o plano. De estas dos categorías, el canal

dispersivo es considerado selectivo en frecuencia, siendo este el tipo de desvanecimiento que resulta en degradación de la señal transmitida.

En conclusión, un canal dispersivo es un tipo de canal que además de introducir ruido blanco Gaussiano aditivo también altera a la señal con los efectos de desvanecimiento selectivo en frecuencia debido al multitrayecto.

1.3 TECNICAS DE ACCESO MULTIPLE

Un recurso de comunicaciones representa el tiempo y el ancho de banda que está disponible para un determinado sistema de comunicaciones. Este recurso es limitado principalmente por el gran número de sistemas de comunicación que necesitan utilizarlo. Un método de acceso múltiple o método de acceso al canal permite que muchas terminales conectadas al mismo medio físico transmitan sobre el mismo y compartan su capacidad. Esto permitirá que los usuarios asociados a estas terminales compartan el recurso de manera equitativa y se reduzca el número de interferencias.

Una de las formas para aumentar la tasa de transferencia en un sistema de comunicación es hacer más eficiente el método de asignación del recurso de comunicación. Para conseguir esto existen algunos métodos de acceso múltiple, los cuales serán presentados a continuación.

1.3.1 Acceso Múltiple/Multiplexación por División de Frecuencia (FDMA)

En esta técnica de acceso múltiple, la asignación de una señal o un usuario a una banda de frecuencia es permanente. El recurso de comunicación puede contener simultáneamente varias señales separadas espectralmente. Las regiones espectrales entre las bandas de frecuencias asignadas son conocidas como bandas de guarda y sirven para reducir la interferencia que se produce entre los canales de frecuencias adyacentes.

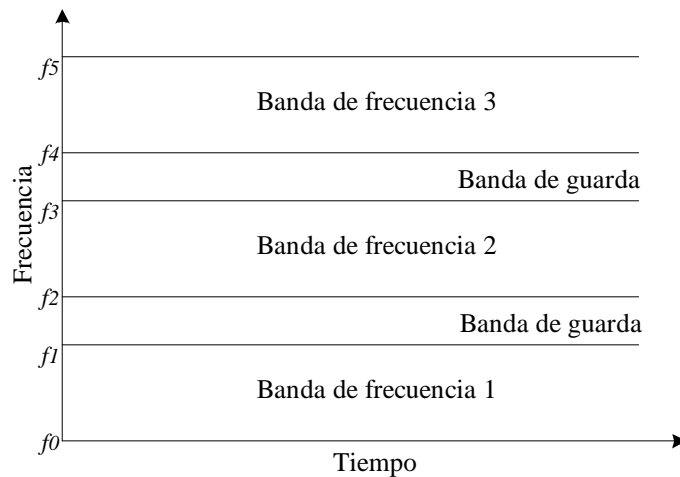


Figura. 1.5. Acceso múltiple por división de frecuencia

1.3.2 Acceso Múltiple/Multiplexación por División de Tiempo (TDMA)

En TDMA el recurso de comunicación es compartido mediante la asignación total de toda la ocupación espectral a cada una de las señales de los usuarios por un determinado tiempo llamado ranura temporal. Las regiones de tiempo entre las ranuras temporales son conocidas como tiempos de guarda y sirven, al igual que la banda de guarda en FDMA, para reducir los efectos de interferencia entre las señales.

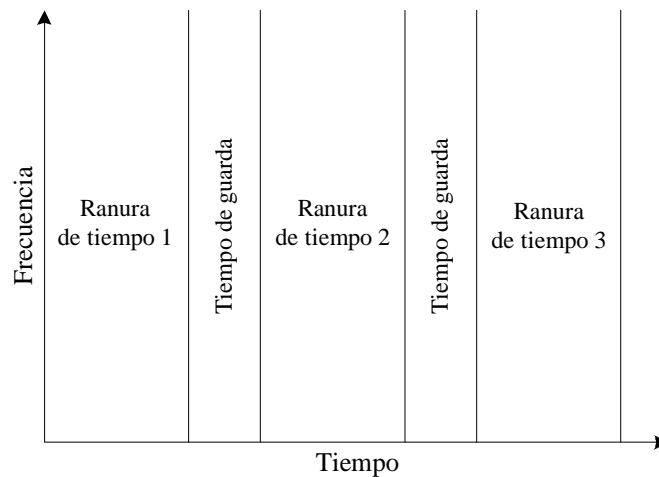


Figura. 1.6. Acceso múltiple por división de tiempo

1.3.3 Acceso Múltiple/Multiplexación por División de Código (CDMA)

Esta técnica divide el medio de transmisión usando diferentes secuencias de código pseudo aleatorias para cada usuario. CDMA es una forma de señalización de espectro

esparcido, debido a que la señal codificada modulada tiene un ancho de banda mucho mayor que la señal original.

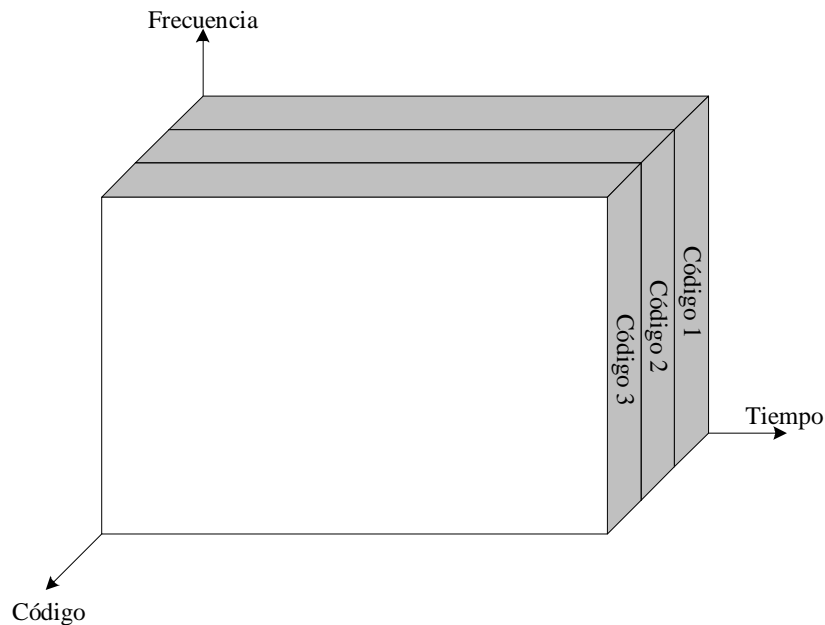


Figura. 1.7. Acceso múltiple por división de código

1.3.4 Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA)

Debido a que en su forma original la técnica OFDM es utilizada para transmitir un flujo de bits sobre un canal de comunicación usando una secuencia de símbolos, OFDM es considerada como una técnica de modulación y no una técnica de acceso múltiple. Sin embargo, OFDM puede ser combinada con acceso múltiple, logrando de esta manera el acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal (OFDMA). En OFDMA, el acceso múltiple es logrado al asignar diferentes subcanales OFDM a diferentes usuarios. OFDMA soporta calidad de servicio diferenciada, ya que se pueden asignar un número diferente de subportadoras a diferentes usuarios.

Además, es posible combinar OFDM con CDMA. Esto permite explotar la diversidad de frecuencia inherente del canal de banda ancha al esparcir cada símbolo sobre múltiples subportadoras. Prasad y Hara compararon varias formas de combinar estas dos técnicas e identificaron tres estructuras diferentes llamadas CDMA multiportadora (MC-CDMA), CDMA multiportadora de secuencia directa (MC-DS-CDMA) y CDMA

multitono (MT-CDMA). Los métodos OFDM/CDMA sufren de altos rangos de potencia pico a media al igual que las transmisiones OFDM no dispersas.

Tanto OFDM como OFDMA han demostrado ser técnicas que combaten de manera efectiva las distorsiones causados por los efectos del multitrayecto. Es por esto que, en los últimos años, se han convertido en los referentes de las tecnologías utilizadas en las transmisiones inalámbricas de banda ancha, tanto fijas como móviles.

1.4 EVOLUCION HISTORICA DE LA TECNICA OFDM

1.4.1 Primeras Contribuciones

Los sistemas de multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM), también conocidos como multiplexación por división de frecuencia (FDM) o sistemas multitono, han sido empleados en aplicaciones militares desde 1960, por ejemplo por Bello, Zimmermann, Powers y Zimmerman, Chang y Gibby entre otros. El primer esquema OFDM fue propuesto por Chang en 1966 para canales desvanecedores dispersivos.

El empleo de la DFT²² para reemplazar el banco de generadores sinusoidales y demoduladores fue sugerido por Weinstein y Ebert en 1971. Esto redujo significativamente la complejidad de implementación de los módems OFDM. En 1980, Hirosaki sugirió un algoritmo de ecualización para suprimir tanto la interferencia intersimbólica como la interferencia intersubportadora causada por la respuesta impulsiva del canal o también por errores en frecuencia y tiempo. En 1980, Peled estudió implementaciones simplificadas de módems OFDM, mientras que Hirosaki estudió una implementación basada en la transformada discreta de Fourier (DFT) del sistema O-QAM OFDM de Saltzberg. Desde la Universidad Erlangen, Kolb, Schüssler, Preuss y Rückriem condujeron más investigaciones acerca de las aplicaciones de OFDM. Cimini y Kalet publicaron los primeros resultados analíticos del rendimiento de los módems OFDM en canales de comunicaciones móviles.

²² Discrete Fourier Transform. Expresa una función discreta y finita en términos de una suma de componentes sinusoidales.

A pesar de que la transmisión OFDM sobre canales de comunicación móvil puede aliviar el problema de la propagación multitrayecto, existen un conjunto de dificultades inherentes a esta técnica. Recientes esfuerzos de investigación se han enfocado en resolver estos problemas, tales como el rango de potencia pico-a-media, sincronización en tiempo y en frecuencia, y en mitigar los efectos del canal desvanecedor selectivo en frecuencia.

1.4.2 Rango de Potencia Pico a Media

Es posible que la señal OFDM, la cual es la superposición de un gran número de señales de subcanal moduladas, pueda exhibir un alto pico de señal instantánea con respecto al nivel de la señal promedio. Más aún, grandes desvíos de la amplitud de la señal se presentan cuando la señal en el dominio del tiempo viaja desde una forma de onda de potencia instantánea baja a una forma de onda de potencia alta, lo cual puede resultar en una alta potencia de distorsión armónica OOB²³, a menos que el amplificador de potencia del transmisor exhiba una extremadamente alta linealidad a lo largo de todo el rango de nivel de la señal. Esto potencialmente contamina los canales adyacentes con interferencia de canal adyacente. Los amplificadores prácticos exhiben un rango de amplitudes finita, el cual puede ser considerado casi lineal. Para prevenir un recorte severo de los altos picos de la señal OFDM, la cual es la principal fuente de emisiones OOB, el amplificador de potencia no debe ser llevado a la saturación. Por este motivo, estos amplificadores de potencia son típicamente operados con un llamado *back-off*, creando cierto espacio para los picos de la señal, lo cual reduce el riesgo de saturación del amplificador y de emisiones OOB.

De manera más explícita, Sheperd, Jones, y Wulich han sugerido diferentes técnicas de codificación, las cuales ayudan a minimizar la potencia pico de la señal OFDM al emplear diferentes esquemas de codificación de datos antes de la modulación. Müller, Pauli, May y Wulich sugirieron diferentes algoritmos para el post procesamiento la señal OFDM en el dominio del tiempo antes de la amplificación, mientras que Schmidt y Kammeyer emplearon colocación de subportadoras adaptativas para reducir el factor cresta. Dinis y Gusmao investigaron el uso de amplificadores de dos ramas, mientras que la técnica OFDM de clústers introducida por Daneshrad, Cimini y Carloni opera con un conjunto de procesadores paralelos FFT parciales con cadenas de transmisión asociadas.

²³ Out of Band. Se refiere a comunicaciones que ocurren fuera del método o canal previamente establecido.

Okada, Nishijima y Komaki así como por Dinis y Gusmao propusieron sistemas OFDM con una robustez incrementada para distorsiones no lineales.

1.4.3 Sincronización

La sincronización de tiempo y frecuencia entre el transmisor y el receptor es de crucial importancia para el rendimiento de un enlace OFDM. Una gran variedad de técnicas han sido propuestas para estimar y corregir tanto los *offsets* de tiempo como los de frecuencia portadora en el receptor OFDM. Algunos algoritmos de adquisición de tiempo y frecuencia basados en el conocimiento de símbolos pilotos o tonos pilotos incrustados en los símbolos OFDM han sido sugeridos por Claben, Warner, Sari, Moose, así como por Brüninghaus y Rohling. Moose, Daffara y Sandell han publicado algoritmos de seguimiento en tiempo y en frecuencia que explotan la extensión cíclica de la señal OFDM.

1.4.4 Antenas Adaptativas

Combinar antenas adaptativas con transmisiones OFDM ha demostrado ser de gran ventaja para suprimir la interferencia entre los canales adyacentes en sistemas de comunicación celular.

1.4.5 Aplicaciones OFDM

La técnica OFDM ha sido adoptada como el nuevo estándar europeo para la transmisión digital de audio (DAB) así como para los sistemas de transmisión de video digital terrestre (DVB-T). También es empleada en la línea de subcriptor digital asíncrona (ADSL) y en sistemas DSL con alta tasa de bits (HDSL). Ha sido sugerida para los sistemas de comunicación en líneas de poder debido a su resistencia a canales dispersivos en el tiempo y a interferencias de banda angosta.

De manera más reciente, se han estudiado aplicaciones OFDM dentro del marco del cuarto programa europeo de tecnologías y servicios avanzados de telecomunicaciones (ACTS). El proyecto MEDIAN investigó una red de modo de transferencia asíncrono inalámbrico de 155 Mbps, mientras que el grupo Magic WAND, desarrolló una red de área local inalámbrica. Llamán y Rohling presentó un rango de diferentes sistemas OFDM que

eran aplicables al reciente concepto de interfase aire orientada a las comunicaciones personales del Instituto de Estandarización de Telecomunicaciones Europeo (ETSI).

Entre otras de las aplicaciones más recientes que utilizan OFDM se encuentran los estándares empleados en redes de área local inalámbricas en la banda de los 5 GHz (IEEE 802.11a en Estados Unidos e HIPERLAN/2 en Europa), y en la familia de estándares IEEE 802.16 para acceso inalámbrico de Internet de banda ancha conocidos como WiMAX. Además, ha sido seleccionada por el comité IEEE 802.11g como la modulación para extender las tasas de datos del muy exitoso estándar IEEE 802.11b o Wi-Fi WLAN.

OFDM también es considerada para ser la técnica de modulación de lo que algunos catalogan como la cuarta generación (4G) de comunicaciones móviles. Para esto se han estado desarrollando tecnologías como Wide OFDM (WOFDM) de WiLAN, la cual ofrece servicios móviles. En el futuro, OFDM jugará un papel importante tanto en la banda ancha inalámbrica fija así como en la móvil.

1.5 VISTA PRELIMINAR DEL CONTENIDO DEL PROYECTO

En el presente capítulo se ha realizado una introducción a las comunicaciones inalámbricas en general y a la técnica OFDM en particular. Para lograr esto último, se caracterizó el canal de comunicaciones en el cual trabajan los sistemas que utilizan la técnica OFDM. Esta caracterización servirá como base teórica al momento de desarrollar el bloque de simulación correspondiente al modelamiento del canal dispersivo. Además, se presentó la evolución histórica de la técnica OFDM, finalizando con las aplicaciones en las cuales es utilizada. Todo esto permitirá tener una visión más acertada acerca del ambiente en el cual se desenvuelve la técnica OFDM, lo cual ayudará a la mejor comprensión de los temas que se tratarán en los capítulos subsiguientes.

Una vez que se han descrito las particularidades del ambiente en el cual trabaja la técnica OFDM, en el Capítulo II se realizará un estudio pormenorizado de la misma, poniendo especial énfasis en describir su implementación utilizando la transformada rápida de Fourier. Esta sección del presente proyecto incluirá características de rendimiento de la

técnica OFDM, con lo cual se podrá discernir acerca de las ventajas y desventajas que OFDM presenta.

En el Capítulo III, teniendo como base teórica lo expuesto tanto en el Capítulo I como en el Capítulo II, se procederá al diseño e implementación de una comunicación OFDM sobre canales dispersivos. Para esto, se definirán los bloques que conformarán el simulador, así como las variables que podrán ser manipuladas. Se realizará todo esto con el objetivo de construir un simulador que refleje las principales características de la técnica OFDM y un canal de transmisión con las características de los canales dispersivos.

En el Capítulo final se realizará una evaluación del simulador OFDM que ha sido desarrollado. Para ello se definirán pruebas para validar el desempeño del simulador así como también para determinar el desempeño de la técnica OFDM sobre canales dispersivos. Con el objetivo de validar los resultados obtenidos, estos serán comparados con los de la literatura clásica.

En la última sección se presentarán las conclusiones y recomendaciones que sintetizarán los resultados que han sido obtenidos en el presente trabajo.

CAPITULO 2

OFDM

OFDM es una técnica de modulación que a pesar de su elegancia conceptual fue limitada tan solo a aplicaciones militares hasta hace no mucho tiempo. Esto ocurrió debido a la complejidad inherente que presentaba la implementación de un módem OFDM. Sin embargo, en los últimos años, debido principalmente a los avances que se han realizado con respecto a la implementación de OFDM y a su capacidad intrínseca de manejar las distorsiones más comunes del ambiente inalámbrico sin la necesidad de utilizar algoritmos complejos, ha llegado a convertirse en una técnica de modulación confiable que presenta muchas ventajas cuando es utilizada en los canales inalámbricos. Es por esto que en la actualidad es el esquema de modulación por defecto para las arquitecturas de redes de área local inalámbricas.

2.1 PRINCIPIOS BASICOS DE UN SISTEMA OFDM

En la Figura. 2.1. un flujo serial de datos pasa a través de un conversor serial a paralelo. Como resultado, los datos son separados en un número de canales paralelos. Los datos que se encuentran en cada canal paralelo son aplicados a un modulador. Es decir, por cada N canales paralelos existirán N moduladores, cuyas frecuencias portadoras serían $f_0, f_1, f_2, \dots, f_{N-1}$. La separación en frecuencia que existe entre canales paralelos es igual a Δf , por lo que el ancho de banda total W es igual a $N \cdot \Delta f$.

Las N portadoras moduladas son combinadas para crear una señal OFDM. La conversión serial a paralelo se la podría ver como la aplicación de cada N ésimo símbolo a un modulador. Esto tiene el efecto de entrelazar los símbolos en cada modulador. Por ejemplo, los símbolos S_0, S_N, S_{2N}, \dots son aplicados al modulador cuya frecuencia de portadora es igual a f_1 . En el receptor la señal OFDM recibida es demultiplexada en N

bandas de frecuencia y las N señales moduladas son demoduladas. Finalmente, las señales en banda base son recombinadas usando un conversor paralelo a serial.

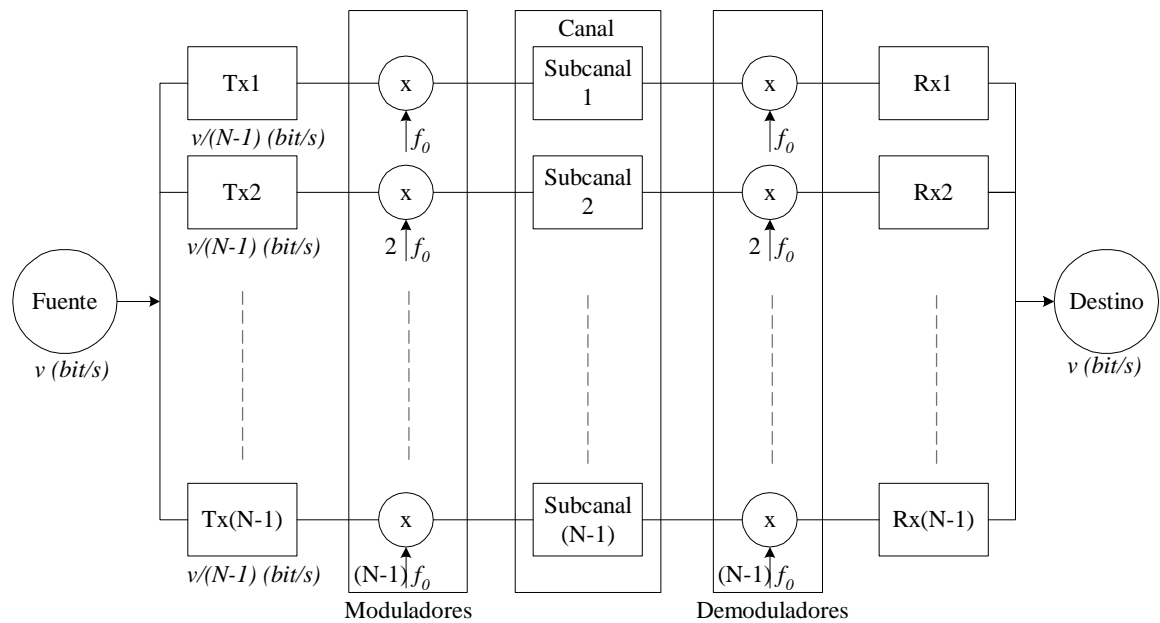


Figura. 2.1. Diagrama de bloques simplificado del módem paralelo ortogonal

2.1.1 FDM y OFDM

En un sistema clásico de datos paralelos, toda la banda de frecuencia de la señal es dividida en N subcanales de frecuencia que no se superponen. Cada subcanal es modulado con un símbolo separado y después los N subcanales son multiplexados en frecuencia. La idea detrás de esto es evitar la superposición espectral de los canales para eliminar la interferencia entre los mismos. Sin embargo, esto conlleva a un uso ineficiente del espectro disponible. Para evitar esta ineficiencia, en 1960 se propuso usar datos paralelos y FDM con subcanales superpuestos.

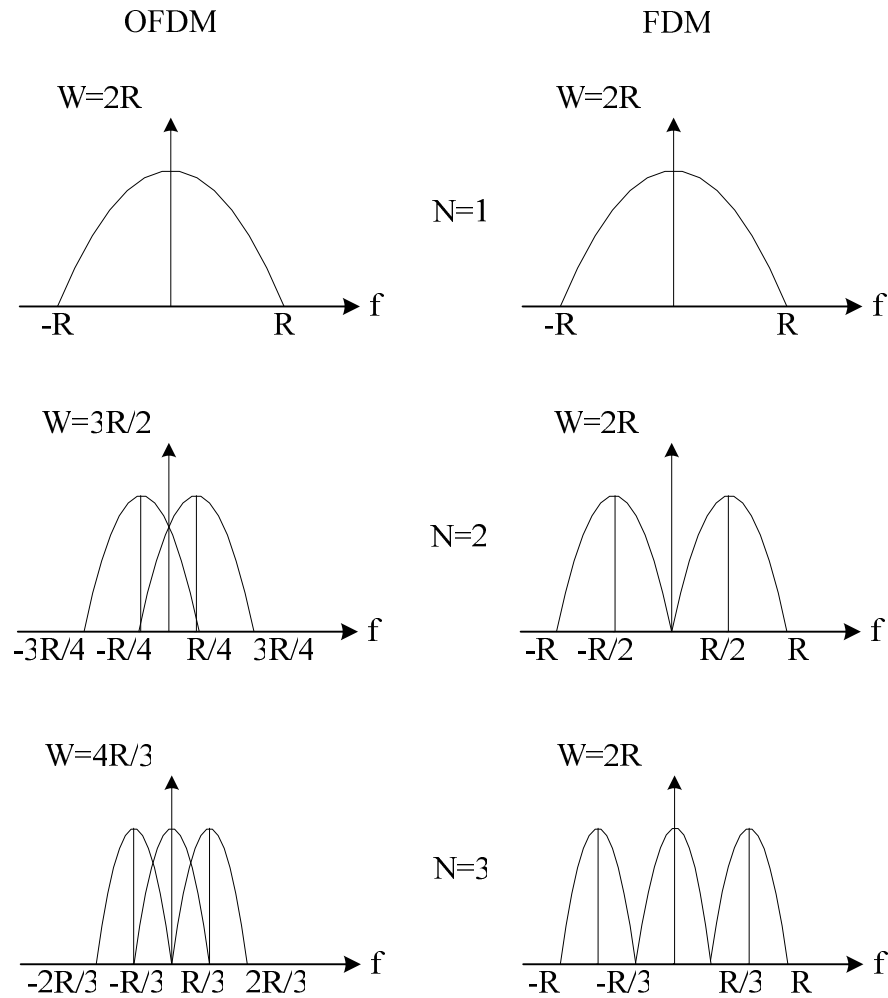


Figura. 2.2. OFDM vs FDM

Como se observa en la Figura. 2.2., el usar la técnica de modulación con sobreposición de multiportadoras incrementa aproximadamente un 50% la eficiencia del sistema. Sin embargo, para poder realizar la sobreposición de las diferentes portadoras, se necesita reducir la diafonía²⁴ entre las mismas, lo cual significa que las diferentes portadoras moduladas deben ser ortogonales.

La palabra ortogonal indica que existe una relación matemática precisa entre las frecuencias de las portadoras del sistema. En un sistema normal de multiplexación por división de frecuencia, muchas portadoras son espaciadas unas de otras de tal manera que las señales pueden ser recibidas utilizando filtros y demoduladores convencionales. En

²⁴ Cualquier fenómeno por el cual una señal transmitida en un circuito o canal de un sistema de transmisión crea un efecto no deseado en otro circuito o canal.

tales receptores, se introducen intervalos de guarda entre las diferentes portadoras, lo cual resulta en una disminución en la eficiencia espectral.

Sin embargo, es posible ordenar las portadoras de una señal OFDM de tal manera que las bandas de los lados de cada una de las portadoras se superpongan, haciendo que estas señales puedan ser recibidas sin interferencias producidas por portadoras adyacentes. Para poder lograr esto, las portadoras deben ser matemáticamente ortogonales.

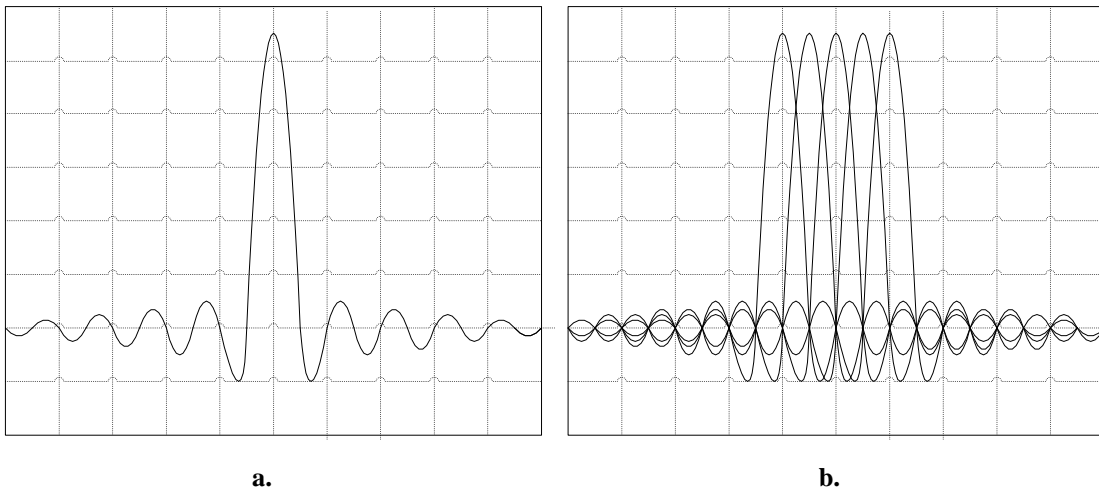


Figura. 2.3. a.Espectro de un canal OFDM b.Espectro de una señal OFDM

2.1.2 QAM – OFDM

La versión más simple de un sistema básico OFDM tiene N sub-bandas, las cuales están separadas de su banda adyacente por una banda de guarda suficientemente grande con el objetivo de prevenir interferencias entre señales que se encuentran en bandas contiguas. Sin embargo, el espectro disponible puede ser utilizado de una manera más eficiente si se permite que el espectro de las sub-bandas individuales se superponga. Al usar detección coherente y tonos de sub-bandas ortogonales, los datos originales pueden ser correctamente recuperados.

En el sistema mostrado en la Figura. 2.2., el flujo de datos seriales es reordenado en una secuencia $\{d_n\}$ de N símbolos QAM de banda base. Cada símbolo serial QAM está espaciado por $\Delta t = 1/f_s$, donde f_s es la tasa de símbolo. En el instante de símbolo n -ésimo, el símbolo QAM d_n está representado por una componente en fase $a(n)$ y una

componente en cuadratura $b(n)$. Un bloque de N símbolos QAM es aplicado a un conversor serial a paralelo, y los símbolos en fase y en cuadratura resultantes son aplicados a N pares de moduladores balanceados. Los componentes en cuadratura $a(n)$ y $b(n)$, con $n = 0, 1, \dots, N-1$, modulan las componente en cuadratura $\cos(w_n t)$ y $\text{sen}(w_n t)$ respectivamente. Hay que resaltar que el intervalo de señalización de las sub-bandas en el sistema paralelo es N veces más grande que en un sistema serial.

Al sumar las portadoras moduladas $a(n)\cos(w_n t)$ y $b(n)\text{sen}(w_n t)$ se crea una señal QAM, donde la n -ésima señal QAM está dada por:

$$X_n(t) = a(n)\cos(w_n t) + b(n)\text{sen}(w_n t) \quad (2.1)$$

Al sumar las salidas de cada señal de subcanal $X_n(t)$, se obtiene la señal FDM/QAM en la forma de:

$$D(t) = \sum_{n=0}^{N-1} X_n(t) \quad (2.2)$$

Este conjunto de N señales FDM/QAM es transmitido sobre un canal de radio móvil. En el receptor, esta señal OFDM es demultiplexada usando un banco de N filtros para regenerar las N señales QAM. Las señales de banda base QAM $a(n)$ y $b(n)$ son recobradas y convertidas a la forma serial $\{d_n\}$. Para obtener la máxima eficiencia de este esquema, el tamaño del bloque debe mantenerse alto y los filtros de sub-banda deben ser hechos para cumplir rigurosamente las especificaciones de diseño.

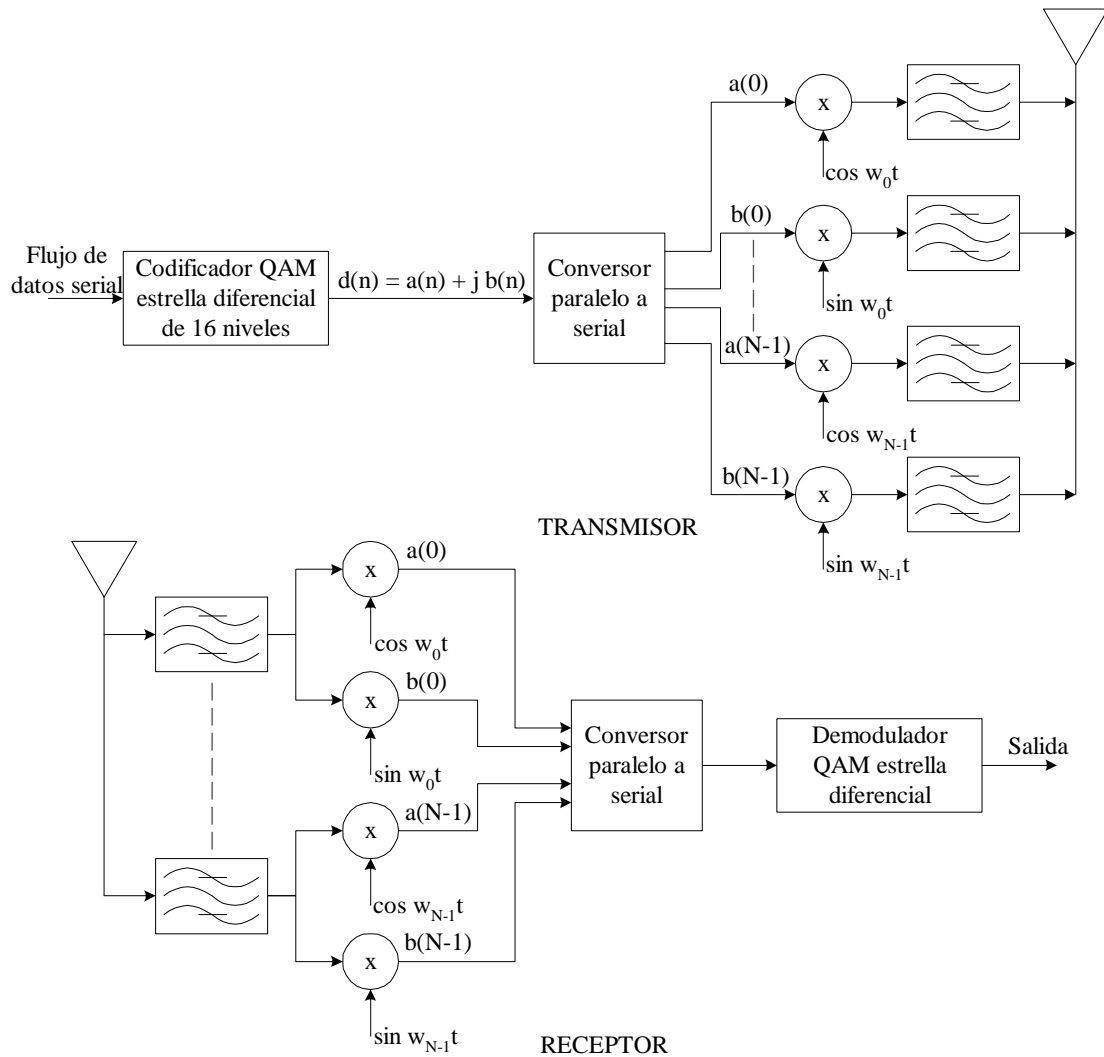


Figura. 2.4. Sistema OFDM detallado

Una de las principales características de este esquema es que el ancho de banda de los subcanales es muy angosto comparado con el ancho de banda coherente del sistema de comunicaciones. Por lo tanto, se aplican las condiciones de un desvanecimiento plano. Los módems de los subcanales pueden utilizar casi cualquier sistema de modulación, siendo QAM una opción atractiva bajo ciertas condiciones.

2.1.3 OFDM Utilizando FFT

Un problema fundamental asociado con el esquema OFDM descrito en la sección anterior es que, para obtener una alta resistencia cuando se presentan desvanecimientos en el canal, el tamaño del bloque, N , debe estar en el orden de 100, lo cual hace que se requiera un gran número de módems de subcanal. Afortunadamente, el tomar la transformada discreta de Fourier (DFT) del bloque original de los N símbolos QAM y

transmitir los coeficientes DFT en forma serial es exactamente igual a la operación requerida por el transmisor OFDM de la Figura. 2.2. Con esto se logra una substancial simplificación en el *hardware* de un módem OFDM si el banco de moduladores/demoduladores de subcanal es implementado utilizando el par computacionalmente eficiente de la transformada rápida de Fourier inversa y la transformada rápida de Fourier (IFFT/FFT).

- **La transformada de Fourier**

En esencia, la transformada de Fourier descompone o separa una forma de onda o función en sinusoides de frecuencias diferentes, las cuales al ser sumadas resultan en la forma de onda original. La transformada de Fourier identifica o distingue las diferentes sinusoides de frecuencia y sus respectivas amplitudes.

La transformada de Fourier de $f(x)$ está definida por:

$$F(w) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-jwx} dx \quad (2.3)$$

, y su inversa está dada por:

$$f(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(w) e^{jwx} dw \quad (2.4)$$

Sin embargo, la era digital exigió un cambio en la forma de la tradicional transformada de Fourier para que se ajuste a los requerimientos de los valores discretos que existen en todos los sistemas digitales. Esta serie modificada fue llamada Transformada de Fourier Discreta (DFT). La DFT de un sistema discreto en el tiempo está definida por:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi kn/N} \quad 1 \leq k \leq N \quad (2.5)$$

, y su inversa asociada está denotada por:

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j2\pi kn/N} \quad 1 \leq n \leq N \quad (2.6)$$

Sin embargo, en los sistemas OFDM se utiliza otra forma de la DFT llamada la Transformada Rápida de Fourier (FFT), la cual es un algoritmo de la DFT desarrollado en 1965. Esta nueva forma de la transformada de Fourier reduce el número de procesos computacionales. Estos procesos se encuentran en el orden de:

$$N^2 \text{ a } \frac{N}{2} \log_2 N \quad (2.7)$$

2.1.4 Modelo Matemático OFDM

Si se usan N subportadoras, y cada subportadora es modulada usando M símbolos alternativos, el alfabeto de símbolos OFDM consiste de M^N símbolos combinados. La señal OFDM es expresada como:

$$v(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{i2\pi kt/T}, \quad 0 \leq t < T \quad (2.3)$$

, donde $\{X_k\}$ son los símbolos de datos, N es el número de subportadoras, y T es el tiempo del símbolo OFDM. El espaciamiento de subportadora $1/T$ hace que sean ortogonales sobre cada período de símbolo. La propiedad de ortogonalidad es expresada de la siguiente forma:

$$\frac{1}{T} \int_0^T (e^{i2\pi k_1 t/T})^* (e^{i2\pi k_2 t/T}) dt = \begin{cases} 1, & k_1 = k_2 \\ 0, & k_1 \neq k_2 \end{cases} \quad (2.4)$$

Para evitar la interferencia intersimbólica en canales desvanecedores multitrayecto se inserta un intervalo de guarda de longitud T_g antes del bloque OFDM. Este intervalo de guarda es conocido como el prefijo cíclico. Teniendo en consideración este intervalo, la señal OFDM estaría expresada por:

$$v(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{i2\pi kt/T}, \quad -T_g \leq t < T \quad (2.5)$$

2.1.5 Prefijo Cíclico

En un transmisor OFDM que usa FFT, después de realizar el cómputo de las N muestras de la transformada de Fourier inversa, un prefijo cíclico de longitud igual a L_p muestras es añadido a las N muestras para formar un símbolo OFDM cíclicamente extendido. El prefijo cíclico es simplemente las últimas L_p muestras de las N muestras de salida de la transformada rápida de Fourier inversa. Por ejemplo, si $N = 4$ y $L_p = 2$ y la salida de la transformada de Fourier inversa de 4 puntos es $[A B C D]$, el prefijo cíclico será $[C D]$. El símbolo OFDM cíclicamente extendido será $[C D A B C D]$. Como resultado, la nueva longitud del símbolo OFDM después de añadir el prefijo cíclico es $N + L_p$.

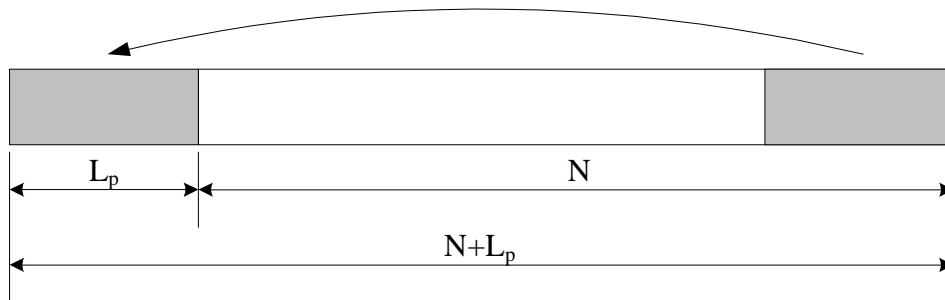


Figura. 2.5. Símbolo OFDM extendido cíclicamente

El colocar el prefijo cíclico explota un concepto de teoría de sistemas lineales discretos en el tiempo para ayudar a remover los efectos del canal en el receptor. En el tiempo continuo, la convolución de dos señales en el dominio del tiempo es equivalente a la multiplicación de las transformadas de Fourier de dichas señales. Esta propiedad no es verdadera a menos que N sea infinito o por lo menos una de las señales convolucionadas sea periódica, con lo cual se dice que las señales son convolucionadas circularmente. A pesar de que un sistema OFDM está limitado a usar un N finito, el prefijo cíclico hace que el símbolo OFDM parezca periódico sobre el intervalo de tiempo de interés.

Las $N + L_p$ muestras del símbolo extendido cíclicamente son pasadas a través de un conversor paralelo a serial. Este flujo serial es transmitido a lo largo del canal. Está transmisión afecta la convolución circular de las muestras en el dominio del tiempo con la respuesta impulsiva del canal. Debido a que el prefijo cíclico hace que el símbolo OFDM

transmitido parezca periódico, esta convolución se convierte en una convolución circular. De acuerdo con la teoría de los sistemas lineales discretos en el tiempo, la convolución circular es equivalente a multiplicar la respuesta en frecuencia del símbolo OFDM con la respuesta en frecuencia del canal. Sin embargo, hay que recordar que la respuesta en frecuencia de los símbolos son los datos antes de ser pasados por el bloque de la transformada rápida de Fourier inversa, por lo que el efecto del canal en un sistema OFDM es el de multiplicar cada símbolo de dato original por un número complejo. Este número complejo es el valor de la transformada discreta de Fourier del canal. Este hecho simplifica enormemente el proceso de equalización del canal en el receptor.

2.2 CARACTERISTICAS DE RENDIMIENTO DE LOS SISTEMAS OFDM

2.2.1 Sistemas Seriales y Sistemas Paralelos

En una transmisión serial convencional, el tráfico de datos es aplicado de manera directa a un modulador que transmite con una frecuencia de portadora que se encuentra posicionada en el centro de la banda de transmisión. La señal modulada ocupa todo el ancho de banda W . Cuando los datos son transmitidos serialmente, el efecto de un desvanecimiento profundo en un canal móvil resulta en una ráfaga de errores en la transmisión si el desvanecimiento se extiende más allá de la duración de varios bits. Por otro lado, durante el período de duración de un N símbolo del sistema serial convencional, cada uno de los N número de moduladores de los subcanales OFDM lleva tan solo un símbolo, los cuales tienen una duración N veces más grande. Por esta razón, un desvanecimiento de canal de idéntica duración tan solo afectará a una fracción de la duración de símbolo de subportadora de dirección extendida transmitido en paralelo. Por lo tanto, el sistema OFDM podrá recobrar todos los N símbolos de subportadora parcialmente contaminados por desvanecimiento. De esta manera, mientras el sistema serial exhibe una ráfaga de errores, empleando la aproximación OFDM ocurren pocos errores o simplemente no ocurren errores.

Otra ventaja de los sistemas OFDM comparados con los sistemas seriales es que, debido a que el período del símbolo ha sido incrementado, el esparcimiento de retardo se convierte en una fracción del período del símbolo significativamente más corta, lo cual hace que el sistema paralelo sea menos sensitivo a la dispersión inducida por el canal.

Además, es importante notar que los sistemas seriales, al igual que un sistema paralelo como OFDM, pueden emplear un prefijo cíclico para contrarrestar los efectos del multitrayecto. Sin embargo, el hacer esto en un sistema serial produce un impacto más severo en la tasa de datos que aquel que se da en un sistema OFDM. Debido a que OFDM utiliza un conjunto de subportadoras de banda angosta, obtiene altas tasas de datos con un período de símbolo relativamente largo porque el ancho de la frecuencia de las subportadoras es inversamente proporcional a la duración del símbolo. Consecuentemente, el añadir un intervalo de guarda corto produce un pequeño impacto en la tasa de datos.

2.2.2 OFDM Sobre Canales Dispersivos

Como se mencionó anteriormente, un canal dispersivo es aquel que además de introducir AWGN en la señal, también la distorsiona debido a los efectos de la selectividad en frecuencia por el multitrayecto. A continuación se presenta el comportamiento de la técnica OFDM bajo la presencia de los parámetros que definen un canal dispersivo.

- **AWGN y OFDM**

Debido a que AWGN en el canal en el dominio del tiempo corresponde a AWGN de la misma potencia promedio en el dominio de la frecuencia, el rendimiento de un módem OFDM en un canal AWGN es idéntico al de un módem serial. De manera análoga a un sistema serial, las características de la tasa de error de bit (BER) versus la relación señal a ruido (SNR) son determinadas por el esquema de modulación usado.

- **Sistemas OFDM y el multitrayecto**

En una arquitectura de red de área local inalámbrica basada en OFDM, así como en la mayoría de los sistemas inalámbricos, la distorsión por multitrayecto es un desafío fundamental. La distorsión se produce en el receptor cuando varios objetos que se encuentran en el ambiente reflejan una parte de la energía de la señal transmitida.

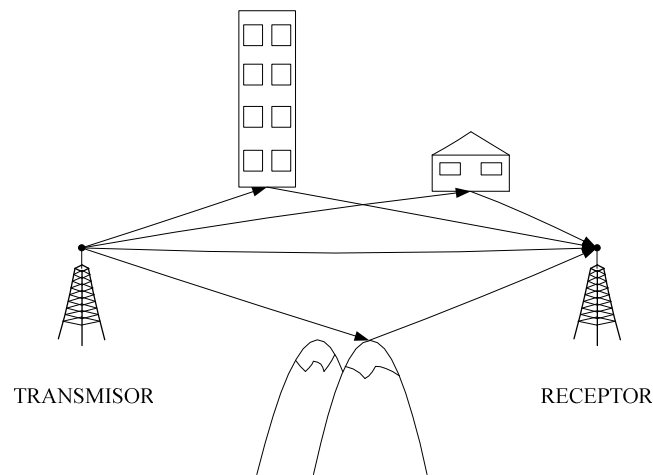


Figura. 2.6. Reflexiones multitrayecto

Las señales multitrayecto reflejadas arriban al receptor con amplitudes, fases y tiempos de retardo diferentes. Dependiendo del cambio de fase relativo entre los trayectos reflejados, los componentes individuales de frecuencia se sumarán de forma constructiva o destructiva. Como consecuencia, el receptor al final del canal de transmisión percibirá que la señal recibida tiene ciertas frecuencias que se han atenuado mientras que otras presentan una ganancia relativa.

En el dominio del tiempo, el receptor percibe múltiples copias de la señal con diferentes retardos en el tiempo. La diferencia de tiempo entre dos trayectos a menudo significa que diferentes símbolos se sobrepondrán entre ellos y crearán interferencia intersimbólica (ISI).

Los sistemas OFDM manejan la interferencia intersimbólica añadiendo una extensión periódica o cíclica al símbolo OFDM básico. Este prefijo cíclico luce como el resto del símbolo OFDM pero no transporta nueva información. Debido a que la extensión cíclica no añade nueva información, el receptor puede ignorar este intervalo de guarda. Cuando el intervalo de guarda es diseñado para ser mayor que cualquier efecto del canal multitrayecto, el receptor es capaz de eliminar la distorsión por ISI al descartar esta extensión cíclica. Con esto se puede decir que la interferencia intersimbólica es removida prácticamente sin añadir complejidad al receptor.

Es importante notar que el hecho de descartar el intervalo de guarda produce un impacto en el rendimiento del ruido debido a que reduce la cantidad de energía disponible en el receptor para la decodificación de los símbolos del canal. Además, reduce la tasa de transmisión debido a que ninguna nueva información es transportada en el intervalo de guarda. Por este motivo, un buen diseño de sistema hará que el intervalo de guarda sea lo más corto posible mientras ofrece suficiente protección multitrayecto.

Debido a que los sistemas OFDM se basan en múltiples subportadoras de banda angosta, en los ambientes multitrayecto las subportadoras localizadas en frecuencias que han sido atenuadas por los efectos de este canal serán recibidas con una menor intensidad de la señal. Este decrecimiento en la potencia de la señal conlleva a un incremento en la tasa de error debido a los bits transmitidos en estas subportadoras debilitadas.

Afortunadamente para la mayoría de ambientes multitrayecto, esto tan solo afecta a un pequeño número de subportadoras y por lo tanto solo incrementa la tasa de error en una porción del flujo de datos transmitidos. Más aún, la robustez de OFDM en un ambiente multitrayecto puede ser dramáticamente mejorada con técnicas de entrelazado y códigos de corrección de errores.

2.2.3 Implementación de los Sistemas OFDM

Mientras que el diseño global de un sistema OFDM se ve simplificado debido a su robustez frente al multitrayecto, existen varias cuestiones de diseño que deben ser superadas para conseguir el máximo rendimiento de estos sistemas. Cuando se trabaja con altas tasas de datos, estas cuestiones son insignificantes si se las compara con los problemas debido al multitrayecto que los sistemas de portadora simple enfrentan. Algunos de los problemas referentes al diseño e implementación de los módems OFDM se tratarán a continuación.

- **Implementación de módems OFDM utilizando FFT**

Una de las dificultades que estaba presente en la implementación de un sistema OFDM, la cual puede ser apreciada en la Figura. 2.1., es la complejidad incrementada si se lo compara con un sistema serial convencional, lo cual es consecuencia del uso de N moduladores y filtros de transmisión en el transmisor y N demoduladores y filtros de recepción en el receptor. Sin, embargo, esta complejidad asociada al número de moduladores se redujo debido al uso de la transformada discreta de Fourier (DFT), y más aún con su implementación más práctica, la transformada rápida de Fourier (FFT).

- **Offset**

Uno de los principales desafíos inherentes al diseño de un sistema OFDM es el de remover el *offset* de frecuencia. El *offset* de frecuencia puede ocurrir cuando el VCO²⁵ en el receptor no está oscilando a la misma frecuencia que el VCO en el transmisor. Para el receptor, este *offset* entre los dos VCOs es visto como una traslación de frecuencia en la señal y puede producir un incremento en la tasa de error. Mientras que esto es una verdad general para todas las modulaciones, OFDM es particularmente sensible a los *offsets* de frecuencia.

Los receptores OFDM usan la transformada rápida de Fourier para implementar los filtros para cada subportadora. Cuando no existe un *offset* de frecuencia, los filtros se alinean perfectamente con la señal recibida y no existe interferencia entre las subportadoras a la salida de los filtros.

Sin embargo, la presencia de un *offset* de frecuencia significa que la señal recibida está desplazada en frecuencia y como resultado los filtros están desplazados en relación a la señal recibida. Como consecuencia, la energía de subportadoras adyacentes se mezclará en cada salida de los filtros. Es decir, las subportadoras dejan de ser ortogonales. Esto produce una interferencia entre portadoras (ICI), debido a que cada una de las subportadoras interfiere con otras subportadoras. Si el ICI es ignorado en el diseño del sistema, la tasa de error OFDM puede degradarse aceleradamente.

²⁵ Voltage-controlled Oscillator. Es un oscilador electrónico diseñado para que su frecuencia de oscilación sea controlada por una entrada de voltaje.

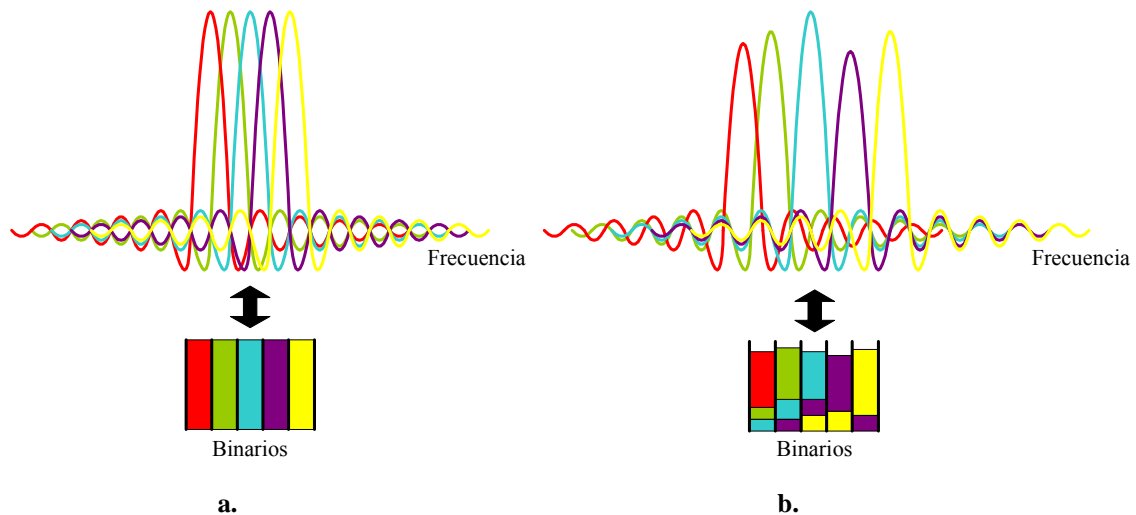


Figura. 2.7. a.Símbolo OFDM ideal b.Símbolo OFDM con *offset* de frecuencia y/o ruido de fase

Afortunadamente, existen varias técnicas simples para estimar y remover el *offset* de frecuencia. Por ejemplo, sistemas basados en paquetes como el IEEE 802.11a usualmente contienen una secuencia de entrenamiento al inicio del paquete la cual está específicamente diseñada para ayudar al receptor en la estimación de la cantidad de *offset* presente entre el transmisor y el receptor. Una vez que el *offset* es conocido, puede ser removido al ajustar la frecuencia del VCO. En conclusión, una estimación confiable del *offset* de frecuencia es trascendental para el buen diseño de un sistema OFDM.

- **Ruido de fase**

Un VCO práctico genera frecuencias que varían con respecto al tiempo, es decir el *offset* de frecuencia no es constante. Para el receptor, estas variaciones de frecuencia lucen como ruido en la fase de la señal recibida, por lo que este problema es conocido como ruido de fase.

En muchos casos, la variación es lenta con relación a la señal y el receptor puede rastrear y remover el ruido de fase resultante utilizando un PLL²⁶. Para los sistemas OFDM, el diseño del PLL puede ser simplificado al insertar datos de entrenamiento en el flujo de símbolos.

²⁶ Phase-locked loop. Sistema de control electrónico realimentado en el cual las magnitudes realimentadas son la frecuencia y la fase.

El uso de símbolos de entrenamiento también es muy común en los sistemas de portadora simple. Sin embargo con OFDM, existen algunas sutiles diferencias. A diferencia de los sistemas de portadora simple, en donde los símbolos de entrenamiento son insertados periódicamente en el tiempo, cada símbolo OFDM contiene algunas subportadoras que son moduladas con los datos de entrenamiento conocidos. Estas subportadoras de entrenamiento son usualmente llamadas tonos piloto.

- **Proporción pico a media (PAR)**

Otro desafío que los diseñadores deben enfrentar es el acomodar el gran rango dinámico de la señal OFDM. Este gran rango dinámico hace que la señal OFDM tenga una gran variación entre la potencia de la señal promedio y la potencia máxima o mínima de la señal.

Un rango dinámico grande es inherente a las modulaciones multiportadora debido esencialmente a que cada subportadora es independiente. Como resultado, las subportadoras pueden sumar constructivamente o destructivamente y esto crea el potencial para una gran variación en la potencia de la señal. En otras palabras, es posible para la secuencia de datos el hacer que todas las subportadoras se alineen constructivamente y se sumen para crear una señal con gran potencia. Es también posible que todas las subportadoras se alineen destructivamente y se sumen dando como resultado una señal muy pequeña. Esta amplia variación crea un número de problemas tanto para el diseño del transmisor como del receptor porque se requiere acomodar un gran rango de potencias de la señal con una distorsión mínima.

El gran rango dinámico de los sistemas OFDM presenta un desafío muy particular al diseño de los amplificadores de potencia. Los amplificadores de potencia prácticos tienen tanto regiones lineales como no lineales, en donde las regiones no lineales se producen debido a grandes potencias de salida. Para reducir la cantidad de distorsión y reducir la energía fuera de banda generada por el transmisor, OFDM necesita operar lo más cerca posible de la región lineal. Teniendo en cuenta su gran rango dinámico, OFDM debe mantener su potencia muy por debajo de la región no lineal para acomodar los picos de potencia de la señal.

Sin embargo, el reducir la potencia promedio afecta la eficiencia. Como resultado, los diseñadores OFDM deben realizar un intercambio cuidadoso entre distorsión y potencia de salida. Esto significa que se debe escoger un nivel de entrada promedio que genere suficiente potencia de salida sin introducir demasiada interferencia o irrespetar alguna consideración espectral.

- **Métodos para controlar el PAR**

Debido a que el PAR en OFDM contribuye a la complejidad y costo en el desarrollo de los sistemas que utilizan esta técnica, se han creado algunos métodos para controlar este problema.

Uno de las formas es hacer que las subportadoras dejen de ser independientes al establecer una relación definida entre la fase y la amplitud, la cual es seleccionada para mantener bajo el PAR.

También se han creado códigos de bloque especiales que generan PARs bajos. El usar estos códigos de bloque especiales como la modulación de subportadora en lugar de permitir a los datos modular las subportadoras directamente puede reducir significativamente la proporción pico a media. En adición, estos códigos de bloque añaden al sistemas capas adicionales con capacidad de corrección de errores.

Otro método simple utilizado para manejar el PAR es el de limitar las señales pico al cortarlas o reemplazarlas con pulsos de amplitudes más bajas. Debido a que esto modifica artificialmente la señal, se incrementa la distorsión en cierto grado. Sin embargo, generalmente es realizado en una forma controlada, con lo que se limita la distorsión inducida por el amplificador de potencia. Como resultado, en mucho de los casos, puede mejorar la potencia de salida total.

Para redes basadas en paquetes, en donde el receptor puede pedir una retransmisión de cualquier paquete que posea errores incorregibles, otra técnica simple pero efectiva es el de utilizar una secuencia de mezcla para controlar el PAR en la retransmisión. En otras palabras, los datos son mezclados antes de modular las subportadoras. Esto de por si no previene la aparición de grandes picos y existirán ocasiones cuando el transmisor introduzca una distorsión significativa debido a grandes picos de potencia en el paquete. Cuando la distorsión es severa, el receptor no decodificará correctamente el paquete y pedirá una retransmisión. Por esto, cuando los datos sean retransmitidos, la secuencia de mezcla cambiará. Si la primera secuencia de mezcla causó un gran PAR, es poco probable que la segunda secuencia haga lo mismo, a pesar de que contenga la misma secuencia de datos.

CAPITULO 3

DISEÑO E IMPLEMENTACION DEL SIMULADOR OFDM

3.1 HERRAMIENTAS DE SIMULACION

Para la implementación del simulador OFDM se requiere de un programa computacional que tenga las prestaciones que se necesitan para realizar el trabajo. Este programa deberá permitir crear cada una de las partes que forman un sistema de comunicación OFDM de tal manera que las variables asociadas a dichas partes puedan ser alteradas. Además, dicho programa deberá ser capaz de procesar los datos que resulten de la variación de las condiciones de cada una de las partes del sistema de comunicación OFDM y presentar dichos resultados de manera clara y entendible. Por todo esto, los programas seleccionados para la implementación del simulador OFDM son MATLAB versión 7.0 y Simulink versión 6.0.

3.1.1 MATLAB

MATLAB es un lenguaje de alto rendimiento utilizado en el procesamiento computacional técnico. Integra computación, visualización y programación en un ambiente fácil de usar, en el cual los problemas y las soluciones son expresados en una notación matemática familiar.

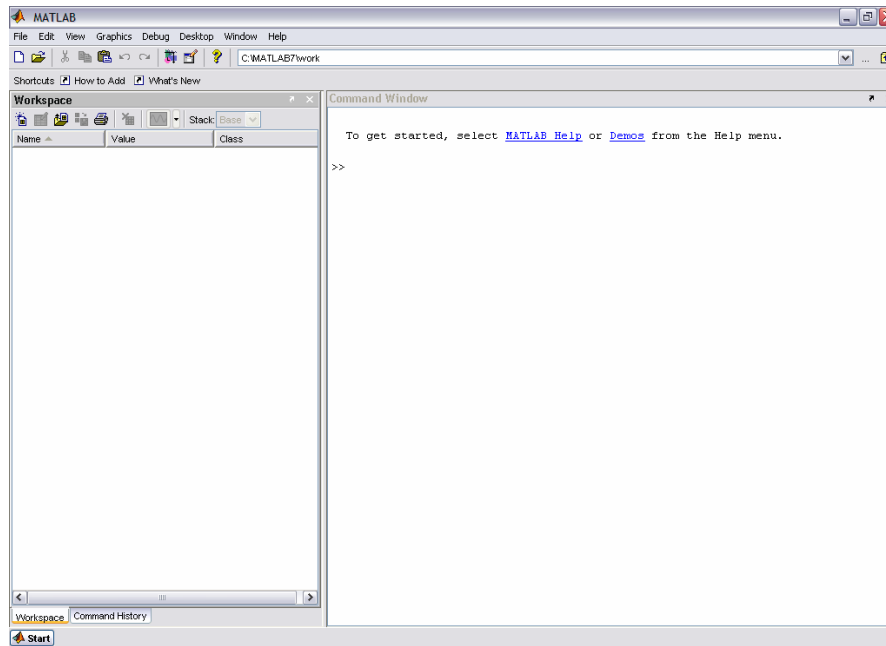


Figura. 3.1. Ventana de inicio de MATLAB

MATLAB ha ido evolucionando desde su creación. En la actualidad, MATLAB permite añadir soluciones para aplicaciones específicas llamadas *toolboxes*. Estos *toolboxes* son conjuntos de funciones de MATLAB que extienden el ambiente de este programa para que pueda resolver problemas particulares.

El sistema MATLAB consiste de cinco partes principales:

- El ambiente de desarrollo
- La librería de funciones matemáticas de MATLAB
- El lenguaje MATLAB
- Los gráficos
- La interfaz del programa de aplicación de MATLAB²⁷

Para mayor información del programa de simulación MATLAB se puede consultar la sección de ayuda de dicha aplicación.

²⁷ Información obtenida de la sección ayuda del programa MATLAB.

3.1.2 Simulink

Simulink es un programa que se encuentra dentro de MATLAB, por lo que necesita del mismo para poder ejecutarse. Permite modelar, simular y analizar sistemas dinámicos. Soporta sistemas lineales y no lineales modelados en tiempo continuo, tiempo muestreado o un híbrido de ambos.

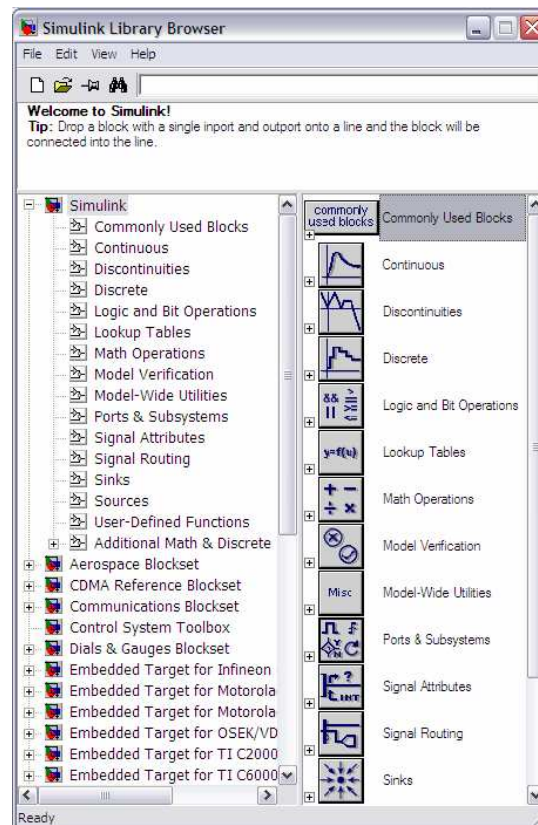


Figura. 3.2. Ventana de inicio de Simulink

Simulink provee una interfaz de usuario gráfica para la construcción de modelos en diagramas de bloques. Una vez que se ha construido un bloque, este puede ser simulado. Se pueden usar bloques de visualización para observar los resultados de la simulación. Además, Simulink incluye varias herramientas que facilitan el análisis de los modelos. Debido a que Simulink está integrado con MATLAB, se puede simular, analizar y revisar los modelos en cualquiera de los dos ambientes en cualquier momento²⁸.

²⁸ Información obtenida de la sección ayuda del programa Simulink.

Para mayor información acerca del programa Simulink se puede consultar la sección de ayuda de dicha aplicación.

3.2 ARQUITECTURA GENERAL DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN OFDM

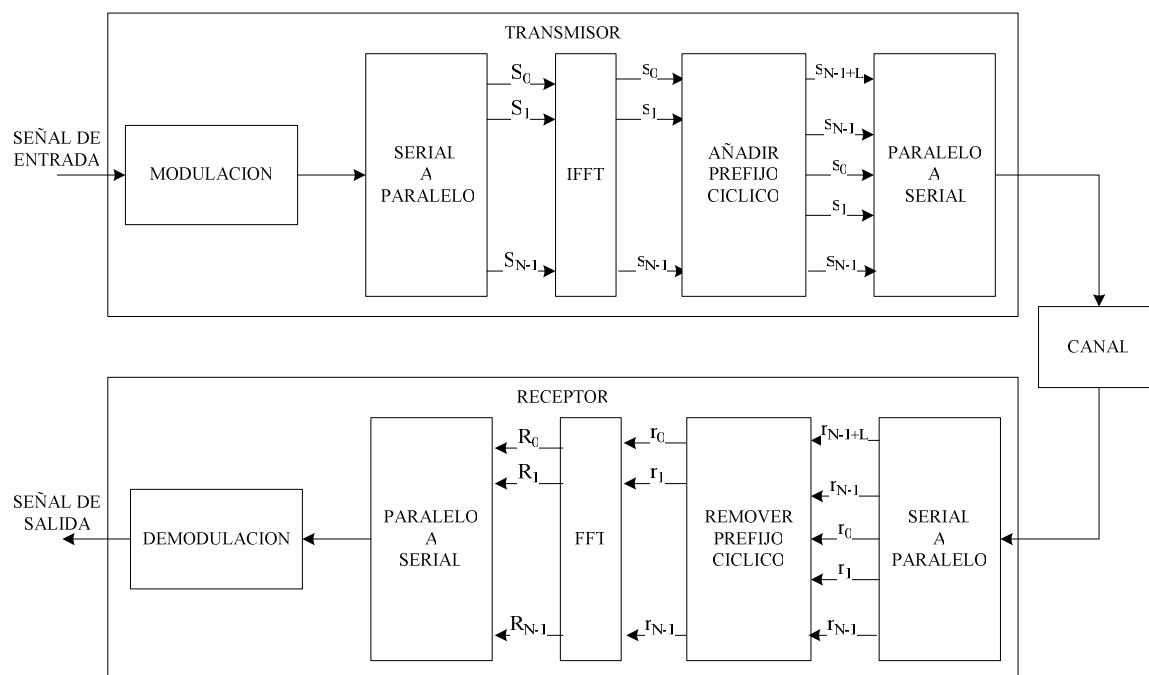


Figura. 3.3. Diagrama de bloques de un sistema OFDM simple²⁹

La Figura. 3.3. muestra un diagrama de bloques de un sistema OFDM simple. Como se puede apreciar en la figura, cuando una señal entra en un sistema OFDM, esta es inmediatamente modulada mediante cualquier sistema de modulación. Una vez que el flujo de datos seriales de la señal ha sido modulado, este es dividido en N flujos paralelos. En el siguiente bloque del transmisor OFDM se toma simultáneamente la transformada rápida de Fourier inversa de los N flujos paralelos. A continuación se añade un prefijo cíclico de longitud L , para lo cual se añade al inicio de la señal los últimos L datos del símbolo OFDM. Finalmente se convierte la señal paralela en un flujo serial de datos. Este flujo serial de datos pasa por un canal de transmisión. En el presente trabajo, el canal de transmisión con el que se trabajará será un canal dispersivo. Al finalizar su paso por el medio de transmisión, la señal ingresa al receptor OFDM, el mismo que realiza procesos inversos a aquellos asociados al transmisor OFDM. Después de que la señal ha pasado por

²⁹ Figura basada en el diagrama de bloques de un transmisor OFDM simple de Louis Litwin en "An introduction to multicarrier modulation".

el receptor OFDM, esta debería ser semejante a la señal original. Esto dependerá principalmente de las características del canal de transmisión.

3.3 IMPLEMENTACION DEL SISTEMA DE COMUNICACIÓN OFDM

La estructura del simulador ha implementarse estará basada en el diseño de la Figura. 3.3. Como se puede apreciar en dicha figura, para desarrollar el simulador OFDM se requiere implementar tres bloques principales: transmisor, canal y receptor. El simulador requerirá también de secciones adicionales que manejen la adquisición y presentación de las señales de entrada y de salida respectivamente, además de un bloque que controle la duración de la simulación. En las secciones posteriores se explicará en detalle la implementación de estos procesos. Es importante señalar que en esta sección del presente trabajo se definirán los bloques que conformaran el simulador del sistema OFDM. La definición de los parámetros asociados a cada uno de los bloques se la realizará en el Capítulo siguiente.

3.3.1 Adquisición de las Señales de Entrada

El simulador aceptará tres tipos de señales de entrada: binarios, imágenes y sonidos.

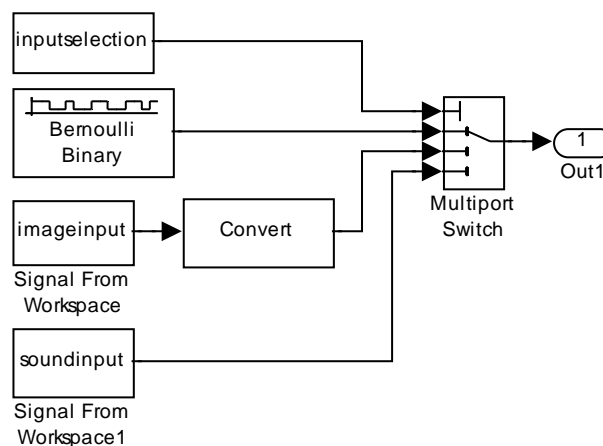


Figura. 3.4. Bloque de señal de entrada en Simulink

La selección del tipo de entrada estará definida por la variable *inputselection* la cual podrá ser modificada desde la interfaz de usuario del simulador. Esta variable hará que el selector multipuerto elija una de las salidas de los bloques que se encuentran conectadas al mismo. Estos bloques generarán los tres tipos de señales antes mencionados. La explicación de la naturaleza de estos bloques y su funcionamiento se presenta a continuación.

- **Generación de números binarios**

La generación de los números binarios se la realizará desde Simulink con un bloque de procesamiento llamado *Bernoulli Binary Generator*. Este bloque permite la generación de números binarios aleatorios usando una distribución Bernoulli.

Adicionalmente, antes de correr la simulación desde Simulink cuando la señal de entrada sea binarios aleatorios, se debe correr un archivo *.m*³⁰ desde MATLAB. Debido a que se trabajará con números binarios como entrada, el programa que se encuentra dentro de este archivo se encargará de inicializar con valores nulos a las variables correspondientes a la imagen y al sonido, además de definir el número de muestras que serán generadas. Para correr este programa se debe escribir el nombre del mismo en la ventana de comandos de MATLAB. El nombre del programa es *binarios_inicio*. Si se desea cambiar el número de muestras con las que se simulará la transmisión OFDM, se deberá ingresar al editor de MATLAB para archivos *.m* y cambiar el valor de la variable *sizein*. El código del programa *binarios_inicio* se encuentra en el ANEXO 1.

- **Generación de imágenes**

La adquisición de la imagen que servirá como señal de entrada para el simulador se la realizará con la ayuda de un archivo *.m* en MATLAB. Por este motivo, previo a correr una simulación seleccionando desde la interfaz de usuario a la imagen como señal de entrada, se debe introducir en la ventana de comandos de MATLAB el nombre del programa de adquisición de imagen. El nombre de este programa es *imagen_inicio*. En el presente proyecto se trabajará con una imagen llamada *imagen_entrada.bmp*, la cual se encuentra en *C:\MATLAB7\work*. Si es que se quisiera trabajar con una imagen distinta, lo

³⁰ Extensión de archivos con los que MATLAB trabaja.

que se debería hacer es editar el programa *imagen_inicio*, cambiando el nombre *imagen_entrada.bmp* por el nombre de la nueva imagen con la que se quisiera trabajar. Es importante señalar que MATLAB buscará el archivo de la imagen en la carpeta con la que esté trabajando, la cual es por defecto la carpeta *work*. Si es que se quisiera trabajar con una imagen que se encuentre en una carpeta diferente, se deberá señalar la dirección exacta de este archivo al momento de editar el programa de adquisición de imagen *imagen_inicio*.

Una vez que el programa *imagen_inicio* ha sido corrido desde la ventana de comandos de MATLAB, los resultados del mismo se trasladarán a Simulink con ayuda del bloque *Signal From Workspace*, el cual permite que los bloques de Simulink trabajen con variables que se encuentran en el *workspace*³¹ de MATLAB. El código del programa *imagen_inicio* se encuentra en el ANEXO 2.

- **Generación de sonidos**

El proceso de adquisición de sonido es muy similar al proceso de adquisición de imagen. Previo a elegir desde la interfaz de usuario al sonido como la señal de entrada, se deberá correr el archivo *sonido_inicio.m* desde la ventana de comandos de MATLAB. Este programa permite transformar en números binarios un archivo de sonido llamado *sonido_original.wav* que se encuentra en la dirección *C:\MATLAB7\work*. Debido a que para realizar la transformación de la señal en números binarios se debe realizar un proceso de cuantización, la señal de sonido que servirá de entrada para el simulador diferirá en cierto grado de la señal original. Es por este motivo por el cual, para poder realizar una comparación posterior con la señal resultante después de haber pasado por los distintos bloques de simulación que conforman el sistema OFDM, la señal original cuantizada será almacenada en la misma ubicación que la señal original con el nombre *sonido_entrada.wav*. Al igual que con la generación de imagen, si es que se quiere trabajar con otro archivo de sonido WAV³² se deberá editar el archivo *sonido_inicio.m*, cambiando el nombre del archivo *sonido_original.wav* por el nombre del nuevo archivo de sonido.

³¹ Es el espacio de trabajo en donde se almacenan todas las variables resultantes de procesar información en MATLAB.

³² Formato de audio digital normalmente sin compresión de datos desarrollado y propiedad de Microsoft y de IBM que se utiliza para almacenar sonidos en el PC.

Finalmente, el paso de la información de sonido desde MATLAB a Simulink se lo realizará con el bloque *Signal From Workspace*, al igual que como se realiza el traspaso de la información de imagen. El código del programa *sonido_inicio* se encuentra en el ANEXO 3.

Es importante señalar que el bloque de generación de binarios, así como el de imagen y sonido, permite manipular el tiempo de muestreo de las señales generadas. Este parámetro definirá la tasa de transferencia con la cual trabajará el sistema de simulación OFDM.

3.3.2 Transmisor OFDM

Siguiendo con la implementación basada en el sistema OFDM de la Figura 3.3., el bloque que representará el transmisor OFDM constará de cinco bloques. Cada uno de estos bloques representará una parte del proceso que debe realizar un transmisor OFDM para poder construir un símbolo OFDM antes de que este sea enviado a través del medio de comunicación.

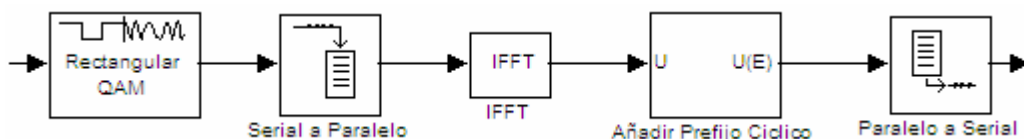


Figura. 3.5. Transmisor OFDM en Simulink

El bloque de transmisión OFDM está conformado por los siguientes componentes: *Rectangular QAM Modulator Baseband*, *Buffer*, *IFFT*, *Selector* y *Unbuffer*.

- ***Rectangular QAM modulator baseband***

Este bloque de Simulink modula la señal de entrada usando el método de la modulación por amplitud en cuadratura rectangular. Entre los parámetros más importantes que pueden ser modificados en este bloque se encuentra el número *M-ario*, el cual define la dimensión de la constelación a ser utilizada.

- **Buffer**

El bloque llamado *Buffer* convierte muestras escalares en salidas basadas en tramas³³ a una tasa de muestreo más baja. Este bloque simulará la conversión serial a paralelo que se necesita en un sistema OFDM una vez que la señal ha sido modulada. Esto significa que este bloque recibirá una señal serial con cierta tasa de transmisión y se obtendrá a la salida una señal paralela con una tasa de transmisión menor o, lo que es lo mismo, un tiempo de símbolo mayor, tal como dice la teoría OFDM. El parámetro que controla el número de canales paralelos a la salida se denomina *Output buffer size*. Esta variable además controla la tasa de transmisión de cada uno de los canales que genera. La relación entre el número de canales a la salida de este bloque y los tiempos de símbolos entrantes y salientes está definida por la siguiente fórmula:

$$Ts_o = Ts_i * N \quad (3.1)$$

, donde:

- Ts_o es el tiempo de símbolo de salida en cada uno de los canales.
- Ts_i es el tiempo de símbolo de entrada de la cadena serial de datos.
- N es el número de canales de salida.

Con la utilización de este bloque se logrará simular la conversión serial a paralelo que se utiliza en un sistema OFDM real. Además, se conseguirá la ampliación en el tiempo de símbolo en cada canal en los que se divide la señal de entrada serial, lo cual es una característica usada por los sistemas paralelos para contrarrestar los efectos de los canales inalámbricos.

- **IFFT**

Este bloque coloca en su salida la transformada inversa de Fourier de la señal que tenga a la entrada. Esta señal de entrada puede ser tanto real como compleja. Un requerimiento de este bloque que debe ser resaltado es que, para poder tomar la transformada inversa de Fourier de una señal de entrada, la dimensión de esta debe tener una longitud igual a un múltiplo de una potencia de base dos.

³³ En el mundo de las comunicaciones, una trama se refiere a un bloque fijo de datos transmitidos en una sola entidad.

El bloque *IFFT* simulará la parte del proceso en un transmisor OFDM en el cual se toma la transformada inversa de Fourier de un N número de canales en un solo paso, sin la necesidad de utilizar diferentes bloques para cada uno de los canales. La utilización de un solo bloque para tomar la IFFT permitió la reducción en complejidad de los módems OFDM, lo cual es una de las razones de la popularidad de la técnica OFDM en la actualidad.

- ***Selector***

El bloque *Selector* selecciona o reordena elementos específicos de un vector o matriz de entrada. En el presente trabajo, este bloque simulará el proceso de añadir el prefijo cíclico al final del símbolo OFDM. Para esto se debe definir las dimensiones de la señal de entrada y el orden de los elementos que aparecerán en la salida.

- ***Unbuffer***

El bloque *Unbuffer* convierte una trama en una salida de muestras escalares con una tasa de transmisión más alta. Es la contraparte del bloque *Buffer* utilizado al inicio del transmisor OFDM. Al trabajar con este bloque no se necesita configurar ningún parámetro, ya que lo que hará es poner en formato serial cualquier entrada en paralelo. En lo referente a los tiempos de símbolo de entrada y de salida, la relación entre los mismos y la longitud del tamaño de la trama de entrada obedece a la fórmula 3.1, con la diferencia de que ahora el tiempo de símbolo de entrada es el tiempo de símbolo de salida y viceversa.

3.3.3 Canal de Transmisión

El canal de transmisión a ser simulado es un canal dispersivo. Debido a que un canal dispersivo a más de afectar a la señal con ruido blanco lo hace también con su selectividad en frecuencia debido al multitrayecto, el bloque del canal dispersivo estará constituido por un bloque de multitrayecto que defina el perfil de retardo y otro bloque que introduzca el ruido blanco en la señal. En este proyecto se trabajará con seis tipos de perfiles de retardo basados en los canales SUI. Es por esto que una variable llamada *channelselection* será la encargada de escoger entre los seis tipos de canales SUI más un canal adicional denominado de prueba, el cual tiene como objetivo experimentar con valores que el

usuario desee introducir. La manipulación de la variable *channelselection* se la realizará desde la interfaz de usuario del simulador OFDM.

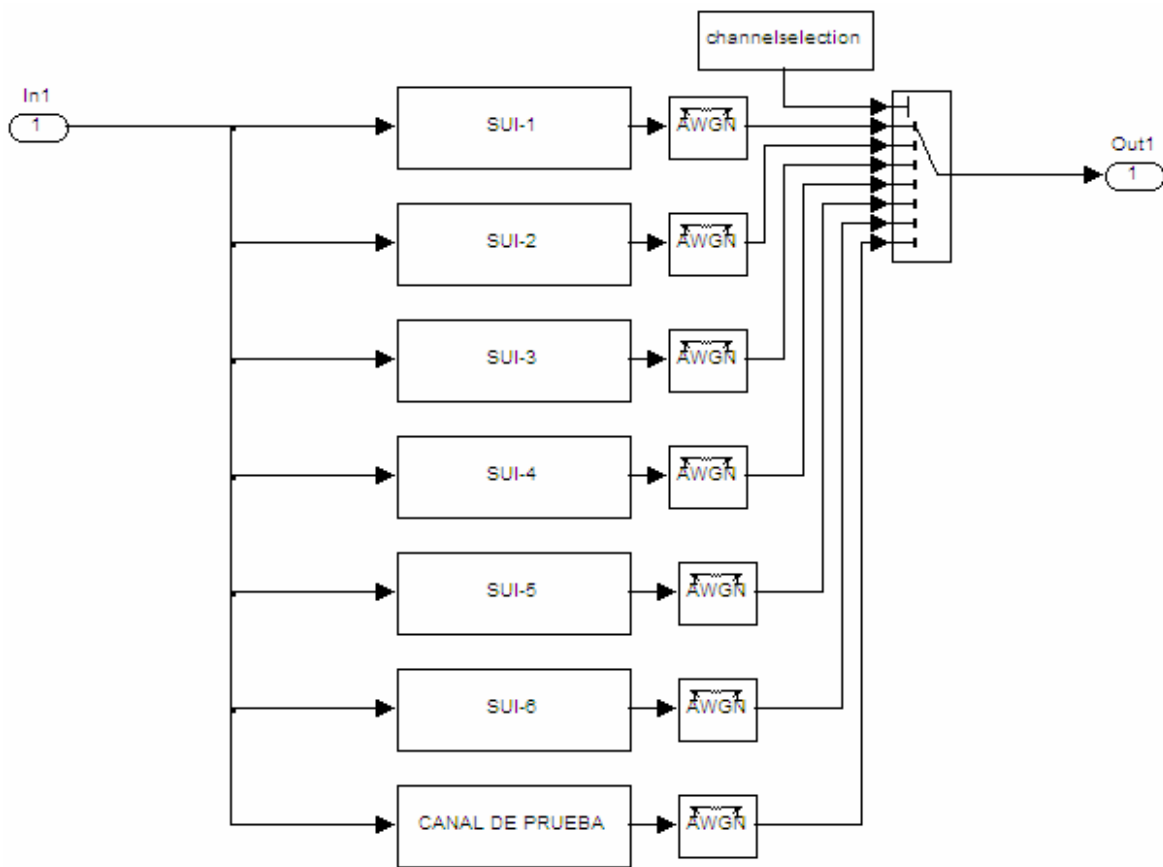


Figura. 3.6. Canal dispersivo en Simulink

Dentro de cada uno de los bloques de los canales SUI y del canal de prueba se encuentran estructuras de bloques idénticas cuyos parámetros varían dependiendo de los valores de retardo y de potencia que caracterizan a cada canal SUI. Estas estructuras de bloques simulan un canal multitrayecto de tres caminos. El primer trayecto hace pasar a la señal original sin alterarla de ninguna manera. Los trayectos dos y tres alteran a la señal, primero retardándola cierta cantidad de tiempo para después atenuarla. Al final, los tres trayectos son ingresados en un bloque que adiciona las tres señales para conseguir una única señal a su salida.

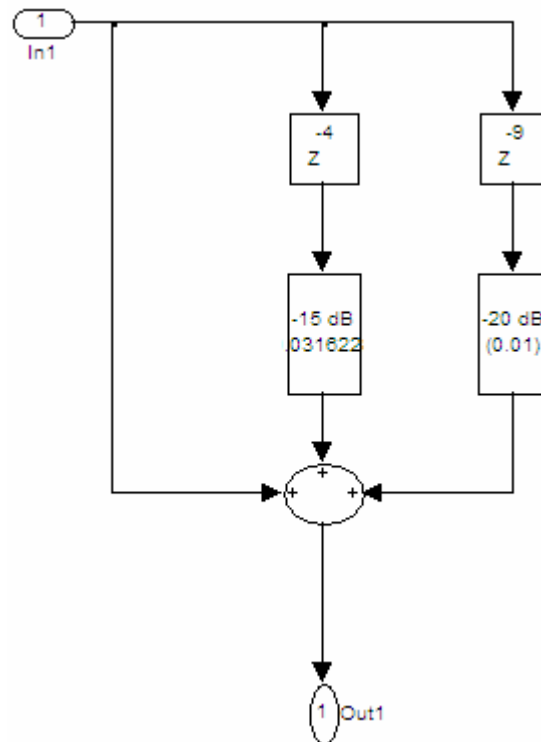


Figura. 3.7. Perfil de retardo en Simulink

Una vez que se obtiene una única señal sumando las dos señales retardadas y atenuadas con la señal original, esta nueva señal se dirige hacia el bloque *AWGN Channel*, el cual añade ruido blanco a la señal que pasa por el mismo. Este bloque permite configurar el valor de la relación señal a ruido en dBs, además de la potencia de la señal de entrada. Debido a que las señales que se obtienen a la salida de cada uno de los canales SUI tienen potencias distintas, se colocó a continuación de cada uno de los bloques de perfil de retardo un bloque *AWGN Channel* con el objetivo de poder ingresar el valor de la potencia de señal de entrada dependiendo del canal SUI por el cual haya pasado la señal. Los resultados de la determinación de la potencia de las señales después de haber pasado por cada uno de los canales SUI así como los valores de los parámetros de retardo y atenuación de cada uno de los seis canales serán presentados en el siguiente Capítulo del presente trabajo.

3.3.4 Receptor OFDM

El receptor OFDM está formado por seis bloques que realizan las funciones opuestas a aquellas correspondientes a los bloques del transmisor OFDM. Los bloques que conforman el receptor OFDM son: *Buffer*, *Selector*, *FFT*, *Frame Status Conversion*,

Unbuffer y Rectangular QAM Demodulator Baseband. A continuación se da una breve descripción de estos bloques, poniendo especial énfasis en la función que cumplen en el receptor, debido a que las generalidades de la mayoría de estos bloques ya fueron explicadas cuando se describió el transmisor OFDM.

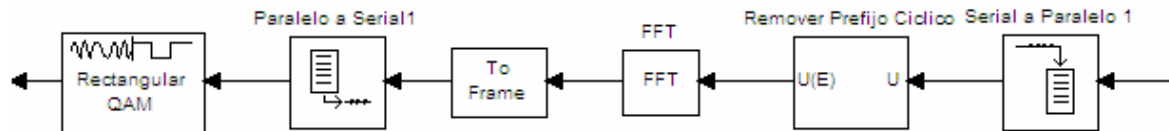


Figura. 3.8. Receptor OFDM en Simulink

- **Buffer**

Este *buffer* en el receptor simulará la conversión serial a paralelo que se realiza una vez que los datos han pasado por el canal de transmisión. Al igual que con el *buffer* en el transmisor, la conversión de serial a paralelo también implica un incremento en el tiempo de símbolo. Es decir, el tiempo de símbolo del flujo de datos serial de entrada será menor que el tiempo de símbolo de cada uno de los flujos paralelos. La relación entre los tiempos de símbolo de entrada y de salida y el número de canales paralelos obedece a la formula 3.1.

- **Selector**

Este *Selector* remueve el prefijo cíclico que fue añadido con el bloque *Selector* del transmisor. El principio de funcionamiento de este bloque no varía. Lo que se hace para poder aplicarlo en el transmisor es que, en lugar de añadir datos al flujo de datos existente, se retira los datos que se sabe son parte del prefijo cíclico.

- **FFT**

El bloque *FFT* tomará la transformada rápida de Fourier de la señal que ha atravesado el *Selector*. Este bloque permite que se realice la operación FFT en un solo paso, evitando la necesidad de colocar un bloque por cada uno de los canales en los cuales ha sido separado el flujo de datos serial.

- ***Frame status conversión***

Este bloque hace que la señal que atraviese el mismo adquiera determinado formato. Debido a que la señal que sale del bloque anterior a este, el bloque *FFT*, pierde el formato de trama, se necesita del bloque *Frame status conversión* para devolverle su formato original. Este proceso de reasignación de formato de trama se hace necesario debido a que el bloque que esta a continuación de este bloque, el bloque *Unbuffer*, solo puede trabajar con datos que tienen el formato de trama.

- ***Unbuffer***

El *Unbuffer* del transmisor realiza la última conversión de paralelo a serial antes de entrar al bloque de demodulación. La relación entre el tiempo de símbolo de entrada de cada canal en paralelo, el tiempo de símbolo de salida del flujo de datos serial y el número de canales obedece a lo ya explicado anteriormente en la sección de *Unbuffer* del transmisor.

- ***Rectangular QAM demodulator baseband***

Este es el último bloque del receptor OFDM. En esta última parte del proceso de recepción, la señal se demodula y teóricamente, dependiendo de los efectos del canal, se recupera la señal original. En la configuración de este bloque es importante considerar que el número *M-ario* debe ser el mismo que fue utilizado en el modulador del transmisor OFDM.

Una vez finalizado el proceso de recepción, a continuación la señal entra en la etapa de cálculo de errores y presentación de resultados.

3.3.5 Presentación de las Señales de Salida y Cálculo de errores

La etapa de presentación de las señales de salida y el cálculo de errores es el último bloque del simulador OFDM. Esta etapa del proceso tiene la función de presentar los resultados obtenidos al final de la simulación. El bloque está formado por cuatro elementos: un bloque llamado *to Workspace* que enviará la señal que ha pasado por el transmisor al *workspace* de MATLAB, el bloque *Error Rate Calculation* que calculará la tasa de error de bit, un bloque de *Display* que mostrará los resultados presentados por el

bloque *Error Rate Calculation* en la ventana de Simulink y finalmente otro bloque *to Workspace* que enviará los resultados del bloque *Error Rate Calculation* pero esta vez al *workspace* de MATLAB.

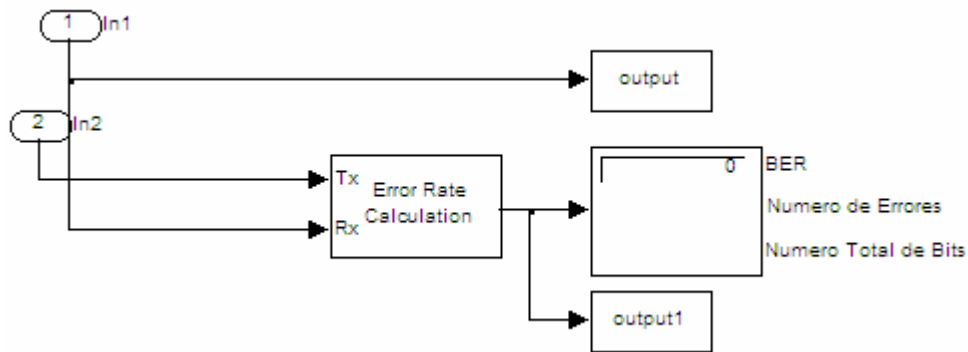


Figura. 3.9. Cálculo de errores y presentación de señales

El bloque *Error Rate Calculation* trabaja con la señal original y con la señal que ha pasado por todo el sistema OFDM y presenta la diferencia entre ambas mediante el parámetro de la tasa de error de bit. Es importante tener en cuenta que, debido a los procesos por los cuales la señal original ha atravesado, existirá un retardo de tiempo entre la señal original y la señal después de haber atravesado por todo el sistema. El bloque *Error Rate Calculation* permite compensar este retardo entre las dos señales al manipular la variable *Receive Delay*. Este parámetro debe tener el valor de retardo introducido por todo el proceso. Esto permitirá que los resultados de la tasa de error de bit sean el reflejo de los efectos del canal dispersivo sobre la señal y no del desfase en tiempo de ambas señales debido al retardo inducido por los diferentes procesos del sistema OFDM implementado en Simulink.

De manera análoga a la adquisición de señales, para la presentación de los resultados se deberá ejecutar un archivo *.m* una vez que ha finalizado la simulación. El archivo *.m* a ejecutarse dependerá del tipo de señal con la cual se ha trabajado. A continuación se realizará una breve descripción de las funciones que realizan cada uno de estos archivos.

- **Presentación de binarios**

Una vez que ha finalizado la simulación, y habiendo trabajado con números binarios como señal de entrada, se debe ejecutar desde el *workspace* de MATLAB el archivo *binarios_fin*, el cual mostrará en el *workspace* los resultados de la tasa de error de bit calculada. El contenido del archivo *binarios_fin.m* se muestra en el ANEXO 4.

- **Presentación de imágenes**

Si es que se ha trabajado con una imagen como señal de entrada, se deberá ejecutar el archivo *imagen_fin* al finalizar la simulación. Este archivo .m mostrará en el *workspace* de MATLAB los resultados del cálculo de la tasa de error de bit y desplegará dos ventanas mostrando en una la imagen original y en la otra la imagen una vez que ha pasado por el sistema OFDM y el canal dispersivo. Con esto se podrá visualizar los resultados que produce el canal dispersivo sobre una imagen. El archivo *imagen_fin.m* se encuentra en el ANEXO 5.

- **Presentación de sonido**

Si el tipo de señal de entrada seleccionada al inicio del simulador ha sido sonido, una vez finalizada la simulación se deberá ejecutar el archivo *sonido_fin*. Este archivo muestra los resultados del cálculo de la tasa de error de bit cuando se ha trabajado con la señal de sonido. Además, despliega una ventana en la cual se muestran el sonido original, el sonido cuantizado de entrada y el sonido cuantizado de salida. Esto permitirá visualizar de manera gráfica los efectos del canal dispersivo sobre una señal. El contenido del archivo *sonido_fin.m* se encuentra en el ANEXO 6.

Los resultados de haber pasado las señales de números binarios, imagen y sonido por el simulador OFDM y por los distintos tipos de canal serán presentados en el siguiente capítulo.

3.3.6 Control de Duración de la Simulación

Este bloque se encargará de controlar la duración de la simulación. El elemento principal es un bloque llamado *Stop*, el cual es una herramienta de Simulink que detiene la simulación cuando la entrada es diferente de cero. El objetivo principal de esta

sección del simulador es detener la simulación cuando todos los datos de la señal de entrada han sido procesados. Adicional al bloque *Stop* se utilizan un bloque llamado *Switch*, dos bloques que entregan las constantes de 1 y 0 y un bloque llamado *Clock* que entrega a su salida el tiempo de simulación conforme la simulación avanza. Estos bloques permitirán crear una condición que diga al bloque *Stop* que se detenga cuando todos los datos ya han sido procesados. Para esto se debe manipular una variable en el bloque *Switch* que, dependiendo del valor que entregue el bloque *Clock*, hará que cambie la salida del bloque *Switch* entre 0 y 1.

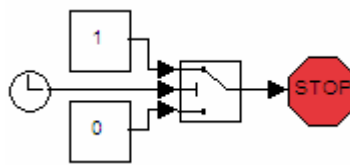


Figura. 3.10. Duración de la simulación

Hay que tener en cuenta que la duración de la simulación variará dependiendo del tipo de señal con la cual se trabaje. En el caso de que se esté trabajando con números binarios, la simulación durará dependiendo de la variable *sizein* que se encuentra dentro del archivo *binarios_inicio.m*, el cual, como se mencionó con anterioridad, debe ser ejecutado antes de correr la simulación usando a los números binarios como señal de entrada. Si es que se está trabajando con la imagen, la duración de la simulación dependerá del tamaño que tenga el archivo de imagen. Lo mismo ocurrirá cuando se esté trabajando con sonido como señal de entrada; la duración de la simulación durará dependiendo del tamaño del archivo de sonido. La implementación de este bloque automatiza el control de la duración de la simulación, ya que, si no existiera este bloque, el usuario del simulador debería conocer de antemano el tamaño del archivo de imagen o sonido con el cual iría a trabajar y debería colocar este dato en la sección reservada por Simulink para controlar el tiempo de la simulación.

3.3.7 Interfaz de usuario del Simulador OFDM

El archivo que contiene todos los bloques que forman parte del simulador OFDM y que han sido explicados en las secciones anteriores se llama *SIMULADOR_OFDM.mdl*³⁴. Al ejecutar este archivo se visualizará el bloque que contiene todas las sub-bloques que conforman el simulador.



Figura. 3.11. Bloque que aparece al ejecutar el archivo *SIMULADOR_OFDM.mdl*

Para acceder a la interfaz de usuario gráfica del simulador OFDM se debe hacer doble clic sobre el bloque de la Figura. 3.11. Al hacer esto se desplegará la ventana que se muestra a continuación.

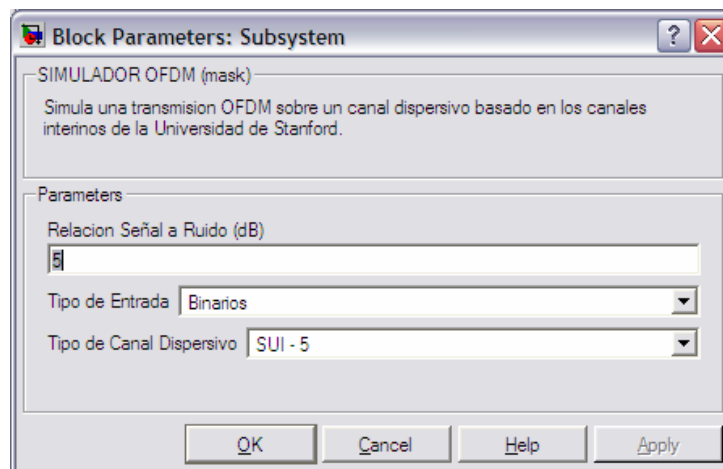


Figura. 3.12. Interfaz de usuario gráfica

³⁴ .mdl Simulink model file. Extensión de los archivos de Simulink que contienen el diagrama de bloques y las propiedades de bloque de la simulación.

En esta ventana emergente existen tres parámetros que pueden ser modificados. Estos parámetros son la relación señal a ruido, el tipo de entrada y el tipo de canal dispersivo. El parámetro relación señal a ruido es un parámetro que acepta cualquier número que se ingrese. Es importante señalar que el valor que representa la relación señal a ruido se encuentra expresado en decibelios. La variable tipo de entrada sirve para elegir el tipo de señal con la cual se trabajará. Esta selección dependerá del tipo de archivo .m que se haya corrido con anterioridad desde el *workspace* de MATLAB. Por ejemplo, si se corrió el archivo *binarios_inicio.m* desde MATLAB, en esta interfaz de usuario que aparece en Simulink se deberá seleccionar como tipo de entrada a la opción Binarios. Los tipos de entrada que acepta el simulador son binarios, imagen y sonido. La última variable que puede ser modificada desde la interfaz de usuario es el tipo de canal. Esta variable puede configurarse con uno de los seis tipos de canales SUI. Los valores que se escogieron como parámetros representativos de cada canal SUI serán presentados en el siguiente capítulo.

3.4 SINTESIS DEL USO DEL SIMULADOR

Si bien el uso del simulador OFDM ha sido explicado conforme se ha presentado cada una de las partes que lo conforman, en la presente sección se realizará un resumen de los pasos que se deben seguir para trabajar con el simulador.

En primer lugar se debe abrir el archivo que contiene todos los bloques que conforman el simulador. Este archivo se llama *SIMULADOR_OFDM.mdl*. Al abrir este archivo emergerá la ventana mostrada en la Figura. 3.11. Una vez abierta esta ventana se debe correr desde el *workspace* de MATLAB un archivo .m dependiendo del tipo de entrada con el que se va a trabajar. Si se va a trabajar con binarios como entrada se deberá correr el archivo *binarios_inicio.m*. En el caso de que se vaya a trabajar con una imagen como señal de entrada se deberá ejecutar el archivo *imagen_inicio.m*. De igual manera, si se va a trabajar con sonido como señal de entrada se deberá correr el archivo *sonido_inicio.m*. El correr estos archivos servirá para la adquisición de las señales y para definir parámetros de inicialización de la simulación como por ejemplo el número de muestras en el caso de las señales binarias. A continuación se debe hacer doble click sobre el bloque contenido en la ventana que emergió al ejecutar el archivo *SIMULADOR_OFDM.mdl*. Eso hará que aparezca otra ventana en la cual se pueden

configurar tres parámetros: relación señal a ruido, tipo de señal de entrada y tipo de canal dispersivo. En este punto del proceso de la simulación es importante tener en cuenta que la señal de entrada que se debe seleccionar debe ser la señal de entrada correspondiente al archivo .m que se ejecutó desde el *workspace* de MATLAB. Una vez seleccionados los parámetros de la simulación, se debe inicializar la misma aplastando el botón *start simulation* que se encuentra en el menú de archivos de la ventana de Simulink. Este botón tiene la forma de un triángulo similar al botón *play* de los reproductores de audio y video. La finalización de la simulación será indicada con la emisión de un sonido. Finalmente, para poder visualizar los resultados de la simulación, se debe ejecutar un archivo desde el *workspace* de MATLAB. Igualmente como sucedió con la adquisición de la señal de entrada, el archivo .m que debe ser ejecutado dependerá del tipo de señal con la cual se trabajó. Los tres archivos .m que mostrarán los resultados de la simulación al haber trabajado con binarios, imagen y sonidos son *binarios_fin.m*, *imagen_fin.m* y *sonido_fin.m* respectivamente.

Con esto concluye la explicación de los componentes del simulador OFDM implementado en Simulink. En el siguiente capítulo se presentarán los parámetros asignados para la configuración de cada uno de los bloques así como los resultados de las simulaciones efectuadas.

CAPITULO 4

EVALUACION DEL SISTEMA

En esta sección del proyecto se definirán las pruebas que permitirán validar el simulador que ha sido implementado. Debido a que los bloques de las diferentes partes que conforman el simulador admiten la configuración de diversos parámetros, previo a la realización de las pruebas que validarán el sistema de simulación que se ha implementado se deben definir dichos parámetros, los cuales serán variables características de determinada tecnología. El hecho de definir los valores de los bloques de simulación con valores característicos de una tecnología permitirá que los resultados obtenidos de las simulaciones puedan ser comparados con estudios que han sido realizados en base a aquella tecnología, lo cual ayudará a corroborar la validez del simulador

4.1 DEFINICION DE LOS PARAMETROS DEL SISTEMA DE SIMULACION

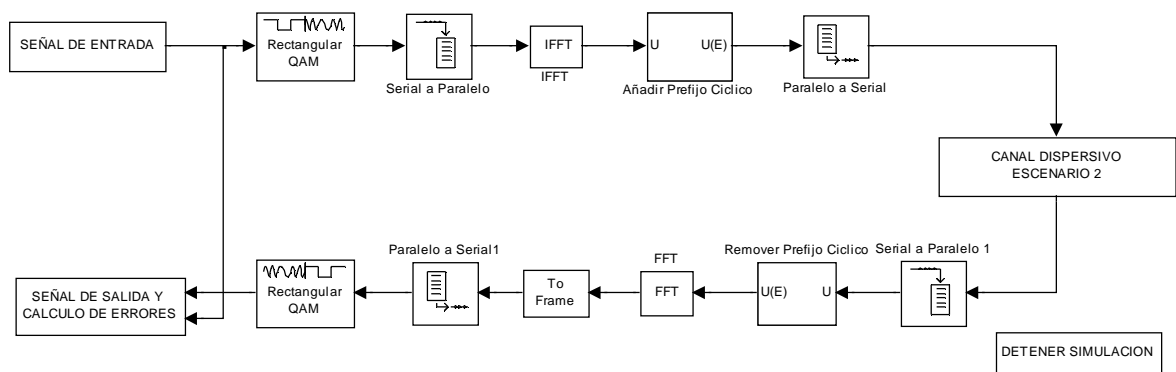


Figura. 4.1. Diagrama de bloques del simulador OFDM implementado en Simulink

En el presente trabajo las variables que se pueden configurar en cada uno de los bloques que conforman el transmisor y el receptor del simulador OFDM estarán asociadas con parámetros característicos de la tecnología WiMAX. Para el caso del tercer bloque del

simulador OFDM, el cual es el canal de transmisión, las variables asociados al mismo simularán un canal inalámbrico basado en los canales SUI, los cuales son utilizados justamente para evaluar sistemas WiMAX. Como se mencionó anteriormente, dentro del estándar IEEE 802.16 existen subdivisiones, las cuales están asociadas a las implementaciones que han sido realizadas. Los subgrupos que encontramos dentro del estándar son el estándar 802.16 propiamente dicho, el estándar 802.16-2004 también conocido como WiMAX fijo debido a su implementación WiMAX y el 802.16-e2005 conocido como WiMAX móvil. El tipo de WiMAX con el que se trabajará en el presente proyecto es el conocido como WiMAX fijo.

4.1.1 Valores de los Parámetros Utilizados en el Transmisor y el Receptor OFDM

Debido a que los elementos que constituyen el transmisor y el receptor OFDM simulan procesos opuestos entre sí, ambos bloques de procesamiento comparten variables que están estrechamente relacionadas. En esta sección se presentarán los valores que van a adoptar los parámetros que caracterizan los bloques del transmisor y el receptor OFDM, los cuales simularán un sistema de transmisión y recepción WiMAX.

Los parámetros que deben ser definidos en el sistema y que están relacionados con los procesos de transmisión y recepción son los siguientes: la tasa de transmisión, el tipo de modulación, la dimensión de la conversión serial a paralelo – paralelo a serial, la dimensión de la transformada rápida de Fourier y la longitud del prefijo cíclico. A continuación se detallará cuál es el valor que tomará cada uno de estos parámetros en el transmisor y el receptor OFDM que se ha implementado.

- **Tasa de transmisión**

De acuerdo con el estándar IEEE 802.16-2004, la tasa de transmisión de un sistema WiMAX fijo puede estar comprendida entre 1 Mbps hasta 75 Mbps. En el sistema de simulación se trabajará con un valor de 8 Mbps, el cual se encuentra dentro del rango establecido por el estándar.

Para poder implementar en el simulador una tasa de transmisión de 8 Mbps se debe manipular un parámetro asociado al bloque de generación de señales. El parámetro que se

debe manipular es el llamado tiempo de muestreo de las señales. Debido a que dentro del bloque de generación de señales existen tres sub-bloques, cada uno de los cuales genera los tres tipos de señales posibles, el mismo tiempo de muestreo debe ser configurado en los tres sub-bloques. Para calcular el tiempo de muestreo sabiendo el valor de la tasa de transmisión basta con saber que la relación entre estos dos parámetros es una relación inversamente proporcional. La relación exacta entre el tiempo de muestreo y la tasa de transmisión está dada por lo enunciado en la fórmula 4.1:

$$Tasa_de_transmision [bps] = \frac{Número_de_bits_por_muestra}{Tiempo_de_muestreo [s]} \quad (4.1)$$

Esto implica que para obtener una tasa de transmisión de 8 Mbps se necesita generar una señal con tiempo de muestreo igual a 1.25×10^{-7} [s] ($1/8$ [Mbps]), teniendo en cuenta que se utilizará un bit para cada muestra.

- **Tipo de modulación**

La tecnología WiMAX utiliza una modulación denominada adaptativa, la cual combina el uso de las modulaciones BPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM dependiendo de la distancia de la estación receptora. Esto se hace debido a que las modulaciones de alto nivel como 64-QAM necesitan más SNR para poder operar a altas tasas de transmisión. Es por este motivo que las estaciones receptoras que se encuentran cerca de la estación transmisora trabajarán con modulaciones de alto nivel como QAM y recibirán una señal a una mayor tasa de transmisión debido a que la relación señal a ruido es mayor comparada con la relación señal a ruido de las estaciones que están alejadas de la estación transmisora, las cuales utilizarán una modulación de bajo nivel como BPSK, obteniendo con esto tasas de transmisión menores.

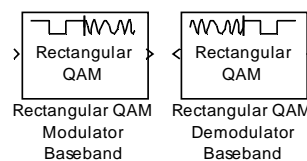


Figura. 4.2. Bloques utilizados en Simulink para la modulación y la demodulación

En el presente trabajo se utilizará el bloque de simulación *Rectangular QAM Modulator* para modular la señal generada desde la etapa de ingreso de señales. El número *M-ario* que se configurará en el bloque de modulación será 2, por lo que la modulación utilizada será 2-QAM o lo que es lo mismo BPSK. De manera análoga, para la demodulación en el receptor se empleará el bloque *Rectangular QAM Demodulator*, el cual debe estar configurado con los mismos parámetros que el modulador del transmisor.

- **Dimensión de la conversión serial a paralelo – paralelo a serial y de la transformada rápida de Fourier**

El esquema de transmisión que se utiliza en la tecnología de acceso de última milla de banda ancha WiMAX está basado en la combinación del número de portadoras que se empleará. Este esquema de transmisión permite utilizar una sola portadora, 256 portadoras o hasta 2048 portadoras OFDM. Para este proyecto se utilizará un esquema de transmisión con 256 portadoras OFDM.

Para poder implementar el esquema de 256 portadoras primero se debe dividir la señal en 256 subcanales para posteriormente tomar de manera simultánea la transformada inversa de Fourier a estos subcanales. Como ya se mencionó en el capítulo anterior, para la división en subcanales se empleará el bloque de simulación llamado *buffer*. Este bloque estará configurado para que divida a la señal entrante en 256 subcanales. Una vez que la señal ha sido dividida, esta ingresará al bloque de la transformada inversa de Fourier llamado *IFFT*. Este bloque está configurado de tal manera que la dimensión de la transformada inversa de Fourier sea igual al número de subcanales que ingresaron. Es decir, para una entrada de 256 subcanales, la dimensión de la transformada inversa de Fourier será igualmente de 256. Antes de salir al canal de transmisión la señal debe pasar por el bloque *Unbuffer*, el cual convertirá la señal paralela de 256 subcanales en una señal serial de un canal. Este bloque no necesita la configuración de ningún parámetro; lo que hará es convertir automáticamente cualquier señal paralela en una señal serial.

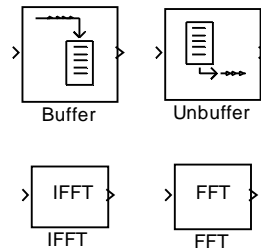


Figura. 4.3. Bloques en Simulink para implementar el esquema de transmisión 256 OFDM

Lo explicado anteriormente hace referencia al proceso que se lleva a cabo en el transmisor. Para el caso del receptor se empleará el proceso inverso al utilizado en el transmisor, por lo cual se colocará un *Buffer* a la entrada del receptor, después de que la señal ha atravesado el medio de transmisión inalámbrico. Este bloque estará configurado para que divida la señal serial en una señal paralela de 256 canales. Luego de esto la señal pasará por un bloque que removerá el prefijo cíclico para posteriormente entrar al bloque *FFT*, el cual tomará la transformada de Fourier de la señal como contraparte de lo que se hizo en el transmisor. Finalmente, antes de que la señal ingrese al bloque de demodulación, la señal paralela será convertida en una señal serial al pasar por el bloque *Unbuffer*. Como se mencionó anteriormente en el caso del transmisor, este bloque no necesita ser configurado.

- **Longitud del prefijo cíclico**

WiMAX define que la longitud del prefijo cíclico utilizado puede ser igual a $1/32$, $1/16$, $1/8$ o $1/4$ del tamaño de la transformada de Fourier. Este rango de variación de la longitud del prefijo cíclico fue creado para permitir que el sistema OFDM utilizado en WiMAX ajuste el tamaño de este prefijo dependiendo de la severidad del canal inalámbrico. De esta manera, si el canal inalámbrico hace que se produzcan demasiados errores en la transmisión de la señal, el sistema OFDM de WiMAX se ajustará automáticamente y utilizará una longitud de prefijo cíclico mayor.

Para este proyecto se empleará un prefijo cíclico de $1/4$ del tamaño de la transformada de Fourier. Debido a que se estableció que el tamaño de la transformada de Fourier sería 256, la longitud del prefijo cíclico será un cuarto de este valor, lo que resulta en un prefijo cíclico de longitud igual a 64.

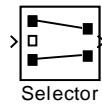


Figura. 4.4. Bloque en Simulink para implementar la inserción-remoción del prefijo cíclico

El bloque que se utilizará para la inserción del prefijo cíclico es el bloque *Selector*. Para hacer que este bloque inserte un prefijo cíclico de longitud igual a 64 lo que se hace es definir en primer lugar el tamaño de la señal de entrada, el cual es 256. Posteriormente se debe configurar que elementos aparecerán a la salida de este bloque. Es aquí donde se hace que se añaden 64 elementos a los 256 elementos de entrada. Estos 64 elementos no contienen información nueva debido a que son los últimos 64 elementos de la señal de entrada. Para el caso de la remoción del prefijo cíclico en el receptor se utiliza el mismo bloque *Selector*, solo que en este caso en vez de configurarlo para que añada elementos se lo configura para que remueva los 64 elementos que fueron insertados en el transmisor.

- **Parámetro de retardo para el cálculo de errores**

El bloque *Error Rate Calculation* debe ser configurado de tal manera que los resultados que sean presentados sean certeros y tengan concordancia con los procesos ejecutados en el resto de bloques de simulación. Debido a estos procesos mencionados, el sistema introduce un retardo entre la señal original y la resultante. El bloque *Error Rate Calculation* permite introducir el valor de este parámetro de retardo para que el cálculo de error sea el correcto.

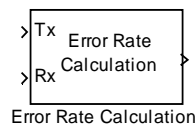


Figura. 4.5. Bloque en Simulink para cálculo de errores

El valor de retardo que se debe ingresar en este bloque es igual a 512. Este valor de retardo se produce debido a la inserción de bloques *Buffer* en el sistema de simulación OFDM. Debido a que en todo el sistema existen dos bloques *Buffer*, cada uno de los cuales retrasa la señal 256 unidades de tiempo, el retardo total es de 512 unidades de tiempo.

4.1.2 Valores de los Parámetros Utilizados en el Canal de Transmisión

Para analizar el desempeño de un sistema de comunicaciones es indispensable contar con un modelo acertado de canal de transmisión. El modelo de canal inalámbrico con el cual se va a trabajar es el modelo propuesto por la Universidad de Stanford en los denominados canales SUI. Este modelo de canal de transmisión ha sido ampliamente utilizado al momento de analizar sistemas de comunicaciones WiMAX. Además define de manera clara los parámetros con los cuales debe contar un canal inalámbrico, lo cual facilita su implementación.

Los parámetros definidos por los canales SUI son el retardo y la atenuación de las señales. Estos parámetros varían dependiendo del escenario de comunicación que se desee simular. En el Capítulo I, en la sección correspondiente a los Canales SUI se definieron dos escenarios, cada uno de los cuales poseía sus características distintivas. Para este proyecto se utilizará el escenario 2 por lo que los valores, tanto del retardo como de la atenuación, obedecerán a lo presentado en la Tabla. 1.7. y en la Tabla. 1.8. Con esto quedan definidos los valores que deberán adoptar los bloques *Integer Delay* y *dB Gain* que ayudan a implementar los seis tipos de perfiles de retardo que están definidos en los canales SUI.

Adicional a los valores de retardo y atenuación que caracterizaban cada uno de los perfiles de retardo se debía definir el valor de la potencia de la señal para cada uno de los canales SUI. Este valor debe ser configurado en los bloques *AWGN* conectados a la salida de cada uno de los canales SUI. Para el cálculo de este parámetro de potencia se utilizó un archivo .m llamado *psd_ofdm*, el mismo que tuvo que ser desarrollado. Este archivo lo que hace es recolectar muestras de la señal a la salida de un canal SUI. Una vez hecho esto obtiene la PSD³⁵ de la señal y calcula la potencia de la misma al encontrar el área bajo la curva con un método de integración. Los resultados de la potencia de la señal después de haber pasado por cada uno de los canales SUI se muestran a continuación:

³⁵ Power Spectral Density. Función real positiva de una frecuencia variable asociada a un proceso estocástico estacionario.

Tabla. 4.1. Valores obtenidos de potencia

Canal	Potencia de la señal [W]
SUI-1	0,0073
SUI-2	0,0074
SUI-3	0,0091
SUI-4	0,0065
SUI-5	0,0108
SUI-6	0,0082

El código del archivo *psd_ofdm.m* puede ser encontrado en el ANEXO 7.

4.2 DISEÑO DE LAS PRUEBAS

Debido a que el simulador permite manejar binarios, imagen y sonido como señal de entrada, se deberán realizar pruebas con cada uno de estos tipos de señal. En general, las pruebas consistirán en realizar una medida de la tasa de error de bit (BER) al modificar el valor de la relación señal a ruido (SNR) de cada uno de los seis tipos de canales inalámbricos SUI. La relación entre el BER y el SNR resultará en curvas que describen el rendimiento del sistema de comunicación OFDM ante los varios tipos de canal inalámbrico SUI a los cuales será expuesto.

La tasa de error de bit BER es determinada a partir de la división entre el número de bits erróneos recibidos y el número total de bits transmitidos. Dentro del simulador que ha sido implementado, el encargado de registrar el número de errores que se ha producido y de calcular el BER es el bloque denominado *Error Rate Calculation*. Se utilizarán los valores calculados por este bloque para registrar la tasa de error de bit del sistema al variar la relación señal a ruido en cada uno de los canales SUI. La modificación del valor de la relación señal a ruido se la realizará en el bloque *AWGN* correspondiente a cada uno de los tipos de canales inalámbricos SUI.

4.3 IMPLEMENTACION DE LAS PRUEBAS

Como se mencionó en la sección anterior, las pruebas consistirán en la variación de la relación señal a ruido para registrar los valores de la tasa de error de bit resultantes. La variación de la relación señal a ruido se la realizará de 5 dBs en 5 dBs comenzando desde 0 dBs hasta que la tasa de error de bit sea igual a cero.

Para el caso de binarios como señal de entrada se trabajará con un número de muestras igual a $1e6$. El número de muestras cuando se trabaje con una imagen o un sonido como señal de entrada variará dependiendo de la longitud de las mismas. La imagen con la que se trabajará en este proyecto generará 38208 muestras, mientras que el sonido generará 15065 muestras.

Una vez definido el número de muestras para cada tipo de señal, se debe seguir el procedimiento detallado anteriormente para poder trabajar con cada uno de los tipos de señal como parámetro de entrada.

Los valores de la tasa de error de bit de los tres tipos de señal correspondientes a cada una de las variaciones de la relación señal a ruido serán registrados en una tabla. En base a los valores de esta tabla se realizará el trazado de curvas que permitirá apreciar el rendimiento del sistema OFDM al ser expuesto a los seis tipos de canales SUI.

4.4 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS

A continuación se presentarán los resultados de las pruebas realizadas para cada uno de los tipos de señales. Para todos los tipos de señal se presentará la tabla donde se muestra el valor de la tasa de error de bit de acuerdo a la variación de la relación señal a ruido para cada uno de los canales SUI. Para el caso de la imagen y el sonido como señal de entrada se presentarán además gráficos de estas señales correspondientes a la variación de la relación señal a ruido en un determinado canal SUI.

4.4.1 Resultados de las Pruebas con Binarios como Señal de Entrada

La Tabla. 4.2 muestra los resultados de las pruebas obtenidas cuando se utilizaron binarios aleatorios como señal de entrada.

Tabla. 4.2. Valores de BER ante la variación de SNR de los canales SUI para binarios

SNR [dB]	SUI - 1 BER	SUI - 2 BER	SUI - 3 BER	SUI - 4 BER	SUI - 5 BER	SUI - 6 BER
0	0,150900	0,152800	0,183200	0,149700	0,202900	0,165700
5	0,033080	0,034370	0,062560	0,046440	0,077290	0,042680
10	0,000570	0,000680	0,006829	0,005784	0,010700	0,001373
15	0,000000	0,000000	0,000059	0,000102	0,000153	0,000000
20	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

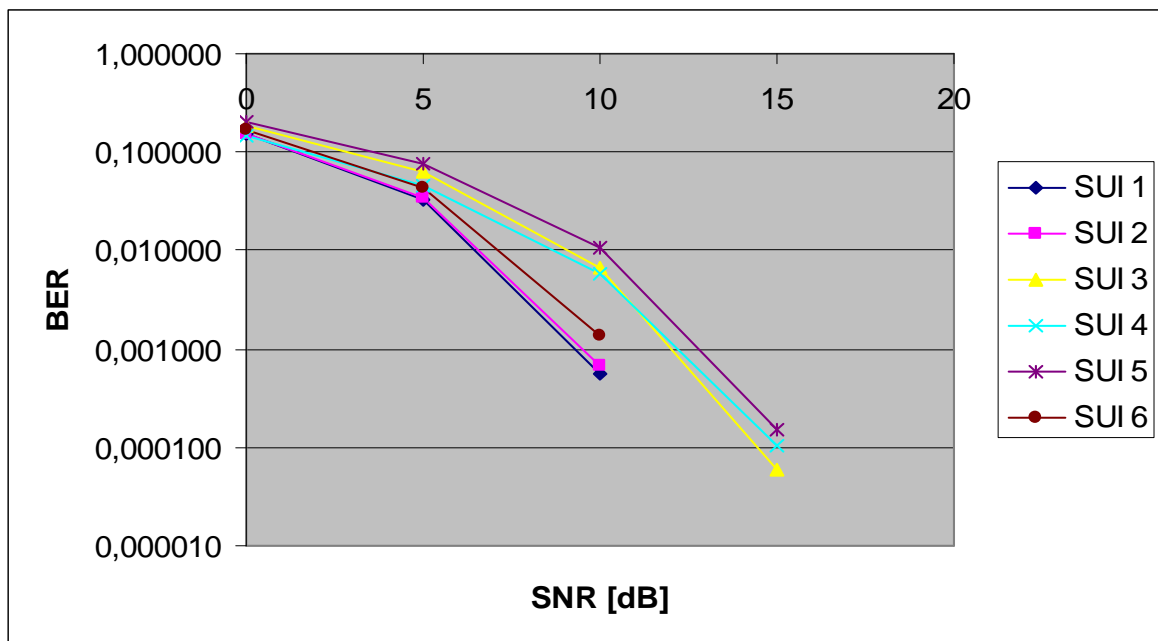


Figura. 4.6. BER vs SNR para binarios como señal de entrada

4.4.2 Resultados de las Pruebas con Imagen como Señal de Entrada

Para el caso de imagen como señal de entrada, además de obtener los resultados numéricos de la relación entre BER y SNR también se produjeron resultados gráficos del cambio de la imagen original conforme se variaba la relación señal a ruido. A continuación se muestran los resultados de variar la relación señal a ruido en cada uno de los canales SUI. Además se muestran los resultados de las imágenes obtenidas ante la variación del SNR en el canal SUI-3.

Tabla. 4.3. Valores de BER ante la variación de SNR de los canales SUI para imagen

SNR [dB]	SUI - 1 BER	SUI - 2 BER	SUI - 3 BER	SUI - 4 BER	SUI - 5 BER	SUI - 6 BER
0	0,151500	0,153600	0,183700	0,150400	0,205600	0,166900
5	0,033660	0,034810	0,064150	0,045670	0,077420	0,042480
10	0,000628	0,000838	0,007014	0,005392	0,011620	0,001858
15	0,000000	0,000000	0,000052	0,000183	0,000209	0,000000
20	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

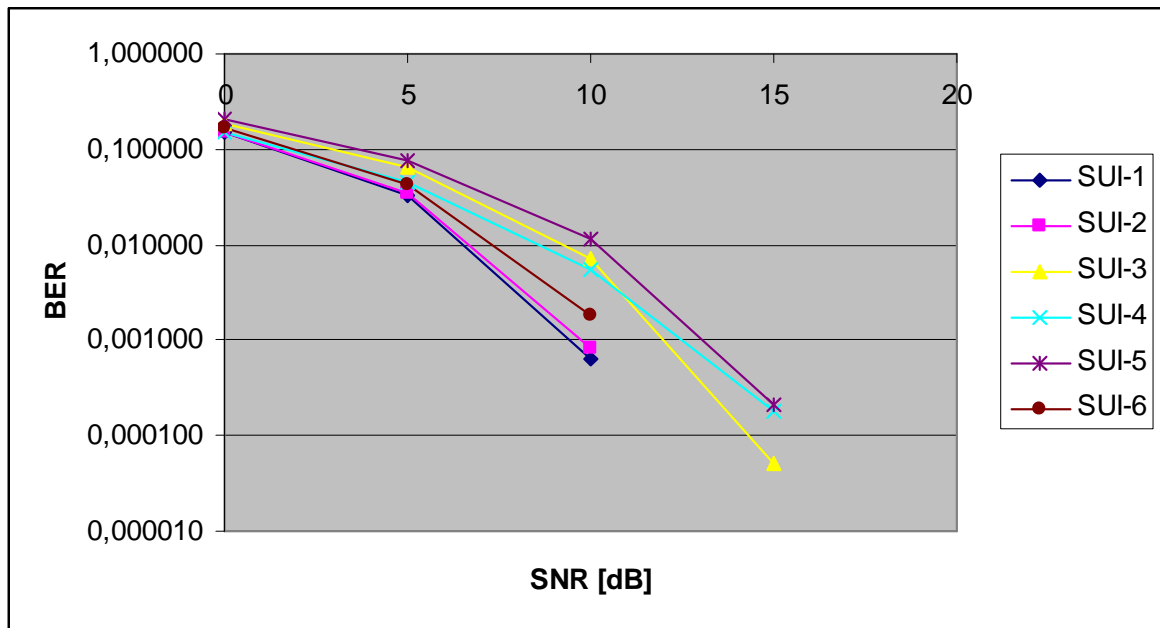


Figura. 4.7. BER vs SNR para imagen como señal de entrada

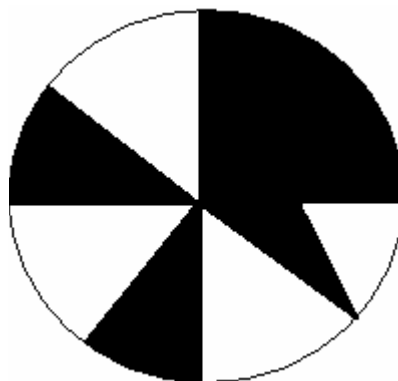


Figura. 4.8. Imagen de entrada original

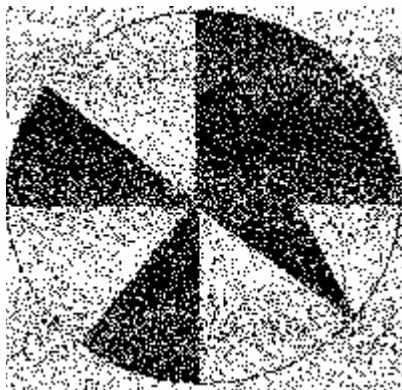


Figura. 4.9. Imagen al pasar por SUI-3 con SNR = 0 dB

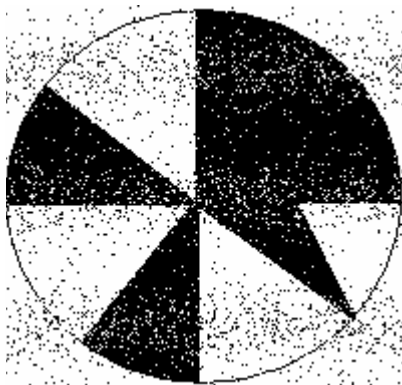


Figura. 4.10. Imagen al pasar por SUI-3 con SNR = 5 dB

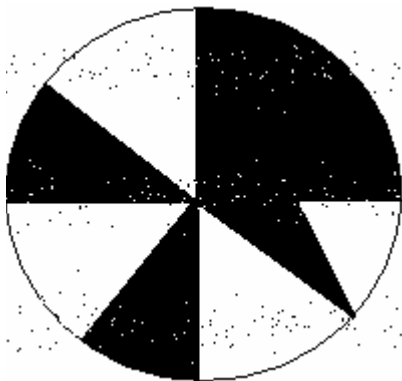


Figura. 4.11. Imagen al pasar por SUI-3 con SNR = 10 dB

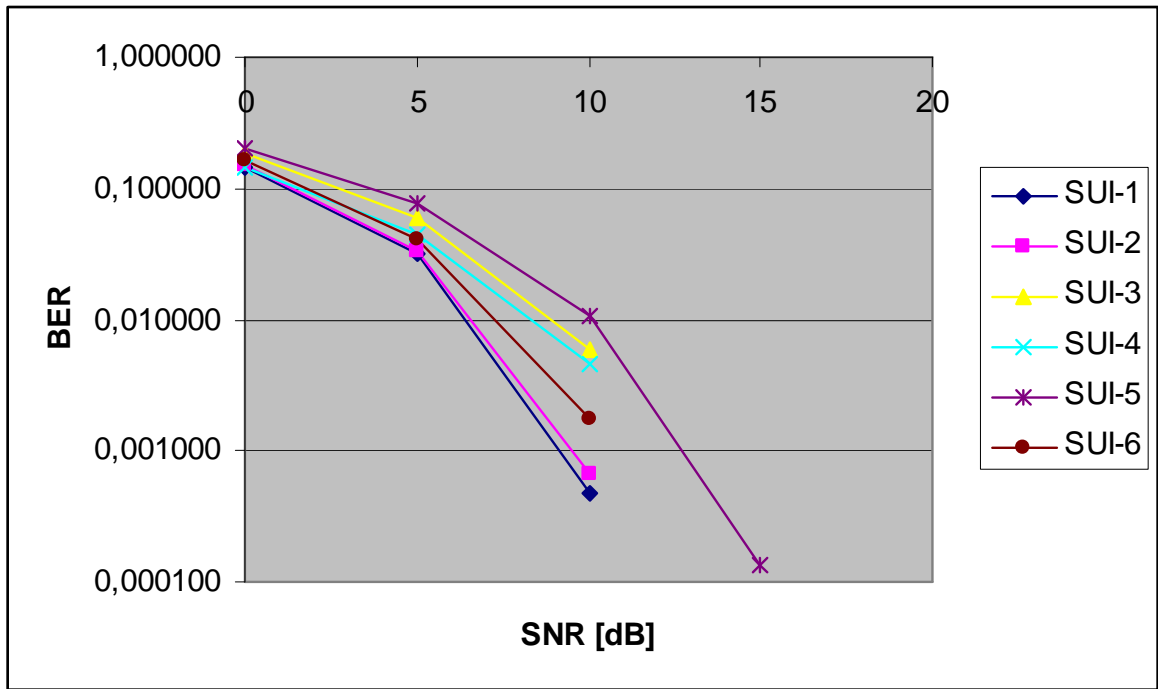


Figura. 4.14. BER vs SNR para sonido como señal de entrada

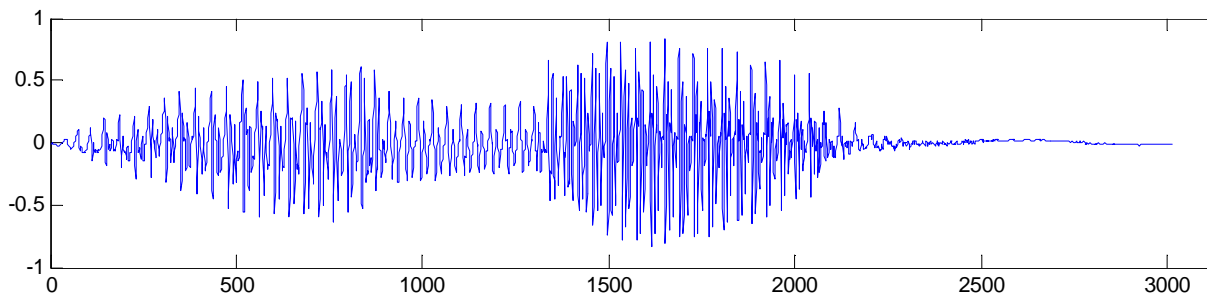


Figura. 4.15. Señal de audio original

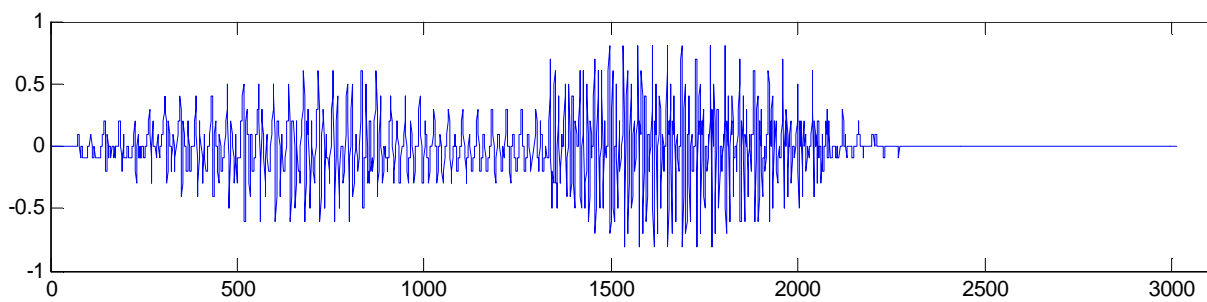


Figura. 4.16. Señal de audio de entrada cuantizada

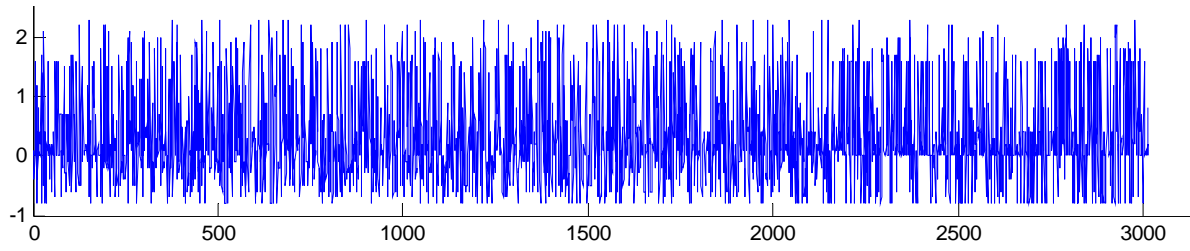


Figura. 4.17. Señal de audio al pasar por SUI-5 con SNR = 0 dB

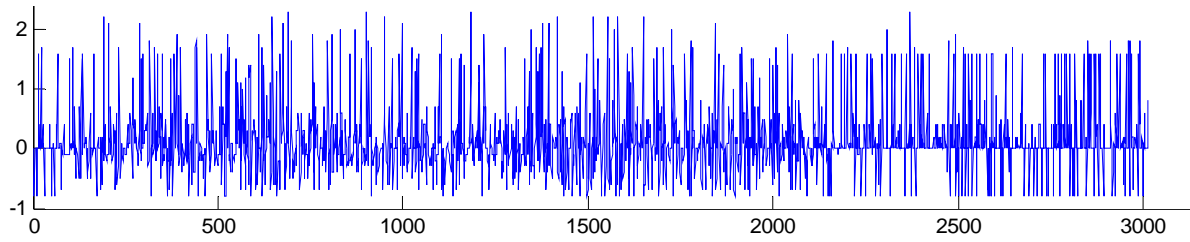


Figura. 4.18. Señal de audio al pasar por SUI-5 con SNR = 5 dB

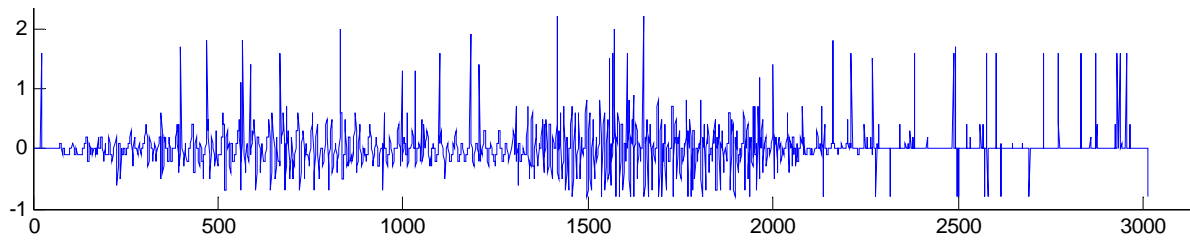


Figura. 4.19. Señal de audio al pasar por SUI-5 con SNR = 10 dB

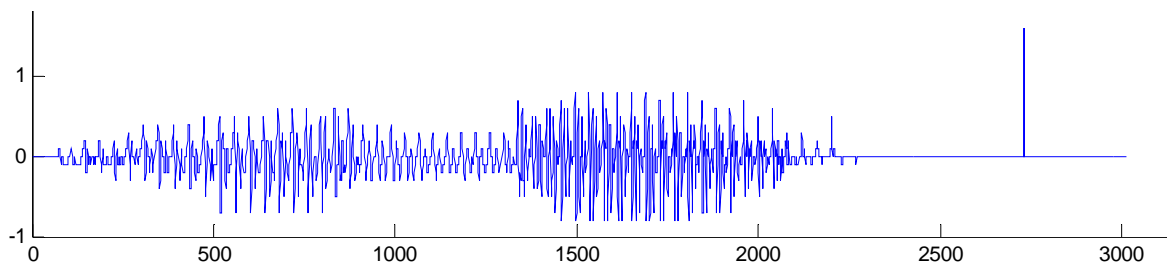


Figura. 4.20. Señal de audio al pasar por SUI-5 con SNR = 15 dB

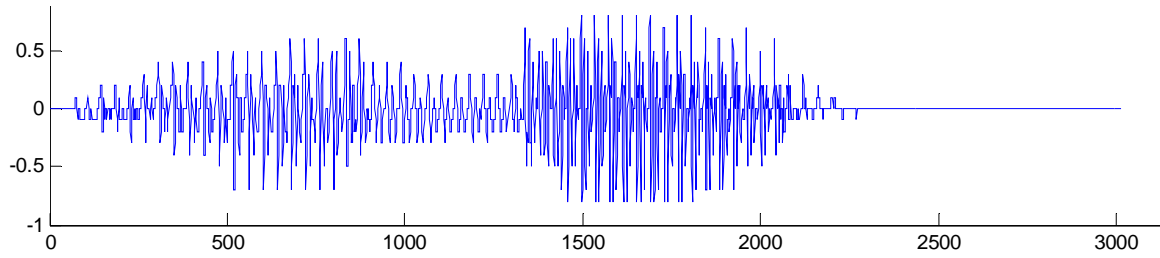


Figura. 4.21. Señal de audio al pasar por SUI-5 con SNR = 20 dB

4.5 ESTUDIO COMPARATIVO

En la sección anterior se presentaron los resultados obtenidos al realizar las simulaciones con los distintos tipos de señal de entrada disponibles. Esta sección del proyecto pretende mostrar resultados que han sido obtenidos en otro estudio los cuales permitirán posteriormente concluir acerca de la validez de los resultados ya presentados.

En su trabajo *“Performance Evaluation of WiMAX/IEEE 802.16 OFDM Physical Layer”*, Mohammad Azizul Hazan realiza un estudio acerca del rendimiento de la capa física de la tecnología WiMAX. Para ello realiza una serie de pruebas en las cuales varía parámetros característicos de la tecnología, como los son los tipos de modulación, los esquemas de codificación, entre otros. Los modelos de canal utilizados para simular el medio de comunicación inalámbrico son los canales SUI. La Figura. 4.22. muestra una curva resultante de los datos obtenidos en el estudio ya mencionado al utilizar BPSK como esquema de modulación.

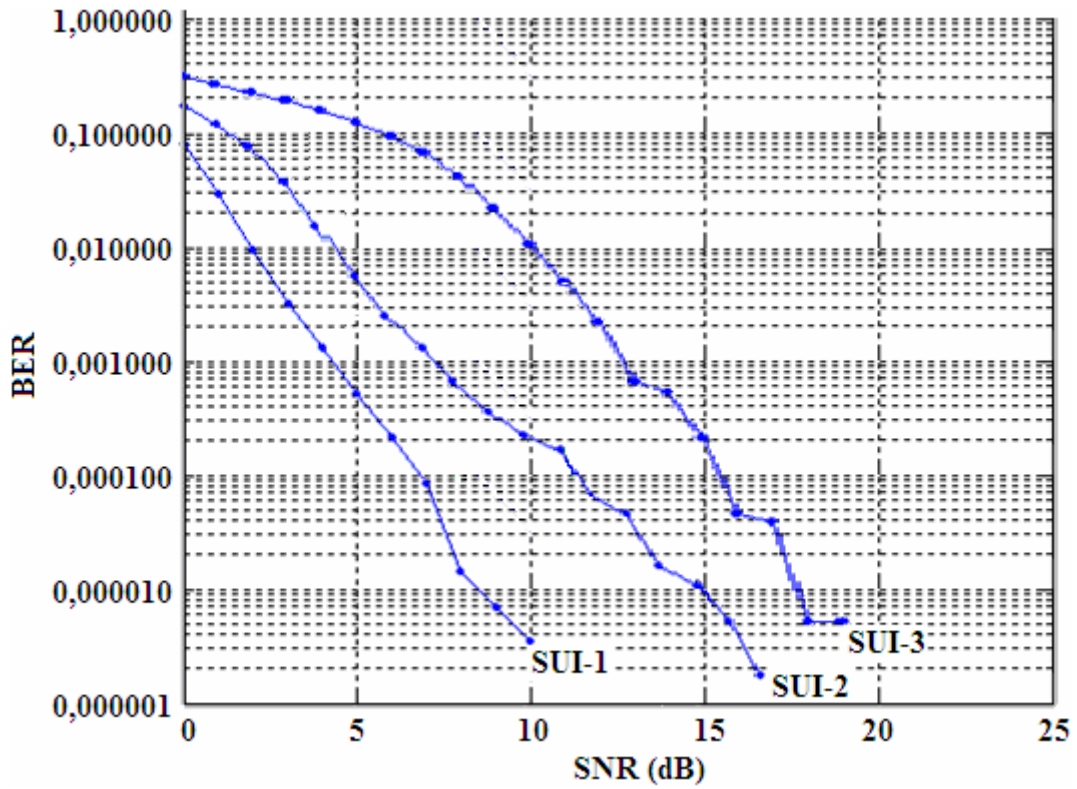


Figura. 4.22. BER vs SNR para canales SUI-1, SUI-2 y SUI-3

La figura mostrada permite apreciar la variación del BER conforme aumenta la relación señal a ruido en los canales SUI-1, SUI-2 y SUI-3. Estos datos referenciales permitirán concluir acerca de la validez de los datos obtenidos con el simulador OFDM que ha sido implementado.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- La continua necesidad del ser humano de poseer mecanismos de comunicación eficientes y funcionales que le permitan transmitir información cada vez a mayores distancias lo llevaron a desarrollar tecnologías resultantes de la genialidad e inspiración. Hace aproximadamente un siglo atrás se comenzaron a realizar las primeras pruebas relacionadas con el uso de tecnologías inalámbricas. Esto marcó el inicio de una era en la cual los medios de comunicación cableados dejarían de ser la única opción para el intercambio de información, dando lugar al aire como un medio de transmisión alternativo. En la actualidad, la necesidad de poseer tecnologías de comunicación inalámbrica que permitan la transmisión confiable de grandes cantidades de información a una mayor velocidad ha logrado que nuevos y más eficientes sistemas de comunicación inalámbricos sean desarrollados como por ejemplo las tecnologías de comunicación inalámbrica Wi-Fi y WiMAX.
- El canal de transmisión utilizado en los sistemas de comunicación inalámbrica es un medio con características que suponen varios desafíos al momento de enviar información. En primer lugar, al ser un medio de libre acceso, el espectro inalámbrico debe ser administrado y regulado para evitar interferencia entre las comunicaciones y garantizar su buen uso por parte de todos aquellos sistemas que lo necesitan. Además, las comunicaciones inalámbricas son muy susceptibles a interferencias debido a que en el medio de transmisión se pueden presentar estructuras físicas externas tales como edificaciones, follaje, entre otras, las cuales causan una degradación de la señal que contiene la información que se desea transportar. Por todas estas dificultades que se encuentran presentes en la transmisión al usar un medio de comunicación inalámbrico se han desarrollado mecanismos que permiten aligerar el impacto de estos problemas, haciendo las comunicaciones inalámbricas más confiables y robustas. La multiplexación por división de frecuencia ortogonal OFDM es una de las técnicas utilizadas para

disminuir el impacto negativo producido por el medio de transmisión inalámbrico en la transmisión de información.

- Las principales características de OFDM, tales como la división de un flujo serial de datos en varios canales paralelos, la utilización de portadoras ortogonales que sirvan a cada uno de estos canales mientras utilizan de manera eficiente el espectro inalámbrico disponible y la inserción de un prefijo cíclico que atenúe el impacto producido por el canal inalámbrico, hicieron que esta técnica se presentase como un sistema de modulación que permitiría a los sistemas de comunicación funcionar de manera más confiable y eficiente. Sin embargo, no fue hasta que se facilitó su implementación al introducir el concepto de la transformada de Fourier para obtener el conjunto de portadoras ortogonales cuando la técnica OFDM dejó de ser una solución elegante explicada en papel para convertirse en una implementación robusta que en la actualidad es utilizada por los sistemas emergentes de comunicación inalámbrica que necesitan enviar información utilizando altas tasas de transmisión.
- A pesar de todas las características que hacen que la técnica OFDM sea ideal para ser utilizada en las comunicaciones inalámbricas, la multiplexación por división de frecuencia ortogonal presenta grandes desafíos al momento de su implementación. Entre los problemas inherentes a OFDM se encuentran el *offset* de frecuencia, el ruido de fase y el gran rango dinámico de potencia que posee. De igual manera, el número de canales paralelos en los cuales se dividirá el flujo de datos serial de entrada y la longitud del prefijo cíclico que se insertará al resto de la señal que contiene la información válida son parámetros que al ser configurados inadecuadamente pueden llegar a degradar el rendimiento de la técnica OFDM. Sin embargo, todos los problemas mencionados anteriormente pueden llegar a ser superados si se tiene mucho cuidado al momento de elegir los valores con los que funcionará esta técnica de modulación tomando en cuenta el tipo de aplicación a la cual va a servir, lo que forma parte de un proceso de diseño eficiente.
- Para poder realizar un buen diseño de una solución de comunicaciones en general se debe contar con herramientas que permitan simular las técnicas que se utilizarán

para la transmisión de la información así como los escenarios que podrán presentarse el momento de su despliegue. El uso de este tipo de herramientas de simulación permitirá al diseñador ajustar las variables que forman parte del sistema de comunicación para que satisfagan los requerimientos mínimos de rendimiento que se necesitan en determinados ambientes de trabajo. Para el caso de los sistemas de comunicación que utilizan como base la multiplexación por división de frecuencia ortogonal, el manejo de simuladores que permitan manipular los principales parámetros que definen esta técnica se hace indispensable debido a que el canal de comunicación inalámbrico sobre el cual trabajan estos sistemas es un medio que degrada de sobremanera a las datos que se desean enviar, por lo cual se necesita que los parámetros OFDM sean definidos de tal manera que logren obtener el mejor rendimiento del concepto atrás de la técnica, lo cual se puede lograr ajustando estos parámetros al exponer este tipo de modulación en varios escenarios de despliegue que simularán el canal de transmisión inalámbrico.

- La simulación de canales dispersivos ha sido a lo largo de la historia de las comunicaciones inalámbricas uno de los puntos que más problemas ha provocado. Esto debido principalmente a que la característica de multitrayecto de los canales dispersivos depende mucho del lugar físico sobre el cual se va a desplegar el sistema de comunicación. Esto hace que sea muy difícil crear un modelo de canal inalámbrico estándar que simule exactamente las condiciones que se presentarán al momento de implementar un sistema OFDM en cualquier locación. Sin embargo, existen modelos de canales dispersivos que son muy utilizados al momento de simular sistemas de comunicaciones inalámbricas como WiMAX debido a que los resultados obtenidos se asemejan mucho a aquellos que se presentan en la implementación en un ambiente real. Uno de estos modelos de canales es el modelo desarrollado por la Universidad de Stanford, el cual es un conjunto de canales clasificados por la densidad de la obstrucción entre el transmisor y el receptor que define los parámetros de atenuación y retardo, parámetros que caracterizan al canal inalámbrico dispersivo.
- De los parámetros definidos por el modelo de canal dispersivo de la Universidad de Stanford (canales SUI) se puede apreciar la relación entre los parámetros de

atenuación y retardo, los cuales definen este medio de transmisión inalámbrico, y la densidad de obstrucción, la cual está dada por la cantidad de elementos físicos que se encuentran entre el transmisor y el receptor. De esta relación se puede concluir que mientras más alta la densidad de obstrucción entre el transmisor y el receptor, los valores de atenuación y retardo toman valores más elevados.

- La relación de la tasa de error de bit (BER) al variar la relación señal a ruido (SNR) ofrece una visión del rendimiento de un sistema de comunicaciones. Para el caso del sistema OFDM configurado con parámetros de la tecnología WiMAX que se simuló en el presente proyecto, en las gráficas de BER vs SNR se puede evaluar el rendimiento del sistema de comunicaciones OFDM al exponerlo a los varios tipos de canales dispersivos SUI. De los resultados que se obtuvieron de las pruebas realizadas en el simulador que fue implementado se aprecia la influencia de los diferentes valores de atenuación y retardo de cada uno de los seis tipos de canales SUI sobre el proceso de comunicación entre el transmisor y receptor OFDM. De las gráficas de BER vs SNR se puede concluir que mientras más elevados son los valores de atenuación y retardo debido a las interferencias físicas entre el transmisor y el receptor, mayor es la tasa de error de bit a un determinado valor de relación señal a ruido. La validez de estos resultados fueron corroborados con resultados de estudios similares que han sido realizados acerca del rendimiento de la técnica OFDM en WiMAX al exponerla a canales dispersivos SUI.

RECOMENDACIONES

- Antes de comenzar con la implementación de un modelo que simule determinado sistema de comunicación es importante definir el alcance del mismo, es decir hasta donde permitirá llegar la implementación del sistema en el estudio de las características del mismo. Esto hará que se tenga una visión clara de las funcionalidades del simulador definiendo además de manera simultánea las características que debe tener la herramienta de simulación que se utilizará. La elección de la herramienta en hardware o en software que permitirá la implementación del simulador es muy importante debido a que esta elección repercutirá en las limitaciones que se tendrá en el momento de desarrollar el simulador. Estas limitaciones no solo estarán dadas por la herramienta de

simulación como tal, sino también por el grado de conocimiento y experiencia que tenga el diseñador en el manejo de dicha herramienta. De ahí que la elección de la herramienta de simulación es un punto trascendental en el proceso anterior a la implementación del modelo de un sistema de comunicaciones.

- En el momento de comenzar con el desarrollo de un modelo de comunicaciones es importante manejar un sistema de implementación por bloques siempre que sea posible. El sistema de bloques permitirá dividir el trabajo en secciones, las mismas que serán interconectadas al finalizar el trabajo. Esta división en secciones permitirá además enfocar el trabajo en resolver problemas asociados tan solo al bloque en el que se está trabajando, lo que hará que se aproveche de mejor manera el tiempo y el proceso de implementación sea más eficiente. Sin embargo, aunque dividir el modelamiento del sistema de comunicaciones en secciones ayude a realizar de mejor manera el trabajo no se debe descuidar la idea de totalidad del proyecto, es decir, no se debe olvidar que al final todas las secciones que han sido modeladas por separado deben unirse para trabajar como un solo bloque de simulación. Si se maneja este sistema de secciones teniendo siempre en cuenta que todas estas secciones individuales forman parte de un gran bloque final, el trabajo de implementación resultará más eficiente.
- Debido a la existencia de varios parámetros que pueden ser manipulados en el simulador tanto en el transmisor y en el receptor OFDM así como en el canal dispersivo, a la mayoría de estos parámetros se les asignó valores predeterminados asociados a una tecnología existente. En este proyecto a los parámetros que definen el sistema de transmisión OFDM se les asignó valores característicos de la tecnología de acceso inalámbrico de banda ancha WiMAX. En las simulaciones realizadas, las variables asociadas al sistema OFDM de transmisión y recepción se las mantuvieron constantes con los valores de la tecnología mencionada mientras que se variaron parámetros correspondientes a los canales dispersivos como por ejemplo el tipo de canal dispersivo y la relación señal a ruido de cada uno de los mismos. Esto permitió centrar el trabajo en el concepto inicial de partida, el cual era analizar el desempeño de la técnica OFDM sobre canales dispersivos

- Si bien las gráficas resultantes de la relación entre el BER y el SNR permiten apreciar el rendimiento del sistema OFDM al exponerlo a varios tipos de canales dispersivos y a la variación de la relación señal a ruido en cada uno de estos canales, el trabajar con imágenes y ondas de sonido como señal de entrada del simulador permite obtener salidas gráficas que facilitan aún más el entendimiento de la degradación de la información al variar parámetros dentro del medio de transmisión.

ANEXO 1

Contenido de *binarios_inicio.m*

```
%INICIALIZACION DEL SIMULADOR OFDM PARA BITS ALEATORIOS COMO SEÑAL DE
ENTRADA
clear all;
clc;
sizein=1e6;%Especifica el tamaño de la muestra ha ser transmitida
imageinput=0;%Da un valor de cero a la imagen de entrada debido a que se va a trabajar con bits
randómicos
soundinput=0;%Da un valor de cero al sonido de entrada debido a que se va a trabajar con bits
randómicos
```

ANEXO 2

Contenido de *imagen_inicio.m*

```
%INICIALIZACION DEL SIMULADOR OFDM PARA IMAGEN COMO SEÑAL DE ENTRADA
clear all;
clc;
[a,mapa]=imread('imagen_entrada.bmp');%Lee la imagen llamada 'imagen_in', asignando sus
valores a la variable 'a'
%y su mapa de colores a la variable 'mapa'

%Hace que la imagen de entrada tenga una sola fila
b=size(a);
sizein=b(1)*b(2);
imageinput=reshape(a,1,sizein);

soundinput=0;%Da un valor de cero al sonido de entrada debido a que se va a trabajar con una
imagen
```

ANEXO 3

Contenido de *sonido_inicio.m*

```
%INICIALIZACION DEL SIMULADOR OFDM PARA SONIDO COMO SEÑAL DE ENTRADA
clear all;
clc;
[a,fs,nbits]=wavread('sonido_original');%Se lee y almacena los datos de 'sonido_original'

%Cuantizacion
q=0.1;%'q' es el intervalo de cuantización
b=q*round(a/q);

%Escritura de la señal cuantizada
wavwrite(b,fs,nbits,'sonido_entrada');

%Bipolar a unipolar
c=min(b);
d=b+abs(c);

%Decimal a binario
e=d/q;
f=dec2bin(e,5);

%%Hace que el sonido de entrada tenga una sola fila
g=size(f);
sizein=g(1)*g(2);
h=reshape(f,1,sizein);

%Transforma de tipo char a tipo double
for i=1:sizein
    if h(1,i)=='1'
        soundinput(1,i)=1;
    else
        soundinput(1,i)=0;
    end
end

imageinput=0;%Da un valor de cero a la imagen de entrada debido a que se va a trabajar con
sonido
```

ANEXO 4

Contenido de *binarios_fin.m*

```
%FINALIZACION DEL SIMULADOR OFDM PARA BITS ALEATORIOS COMO SEÑAL DE
ENTRADA
%Muestra la tasa de error de bits, el numero total de errores, y el numero
%total de bits transmitidos
clc;
BER=output1((sizein+2*256),1)
format long, BER;%Cambia el formato de la variable BER para que se muestren 15 digitos dobles
NUMERO_TOTAL_DE_ERRORES=output1((sizein+2*256), 2)
NUMERO_TOTAL_DE_BITS_TRANSMITIDOS=output1((sizein+2*256),3)
```

ANEXO 5Contenido de *imagen_fin.m*

```
%FINALIZACION DEL SIMULADOR OFDM PARA IMAGEN COMO SEÑAL DE ENTRADA
clc;
c=squeeze(output);%Remueve las dimensiones simples
for i=1:sizein
    d(i,1)=c((i+(2*256)),1);%Se debe depurar 'c' de tal manera que no se tomen en cuenta aquellos
    %binarios resultantes de los retardos de procesamiento
end
e=reshape(d,b(1),b(2));%Se da un formato adecuado a los datos recibidos para que puedan ser
representados en
%una imagen
imwrite(e,'imagen_salida.bmp');%Se dibujan los datos recibidos en la imagen llamada
'imagen_salida'
[e,mape]=imread('imagen_salida.bmp');%Se asigna a 'mape' el mapa de colores de
'imagen_salida'

%Muestra imagen de entrada
figure('Position', [300 250 size(a,1) size(a,2)]);
image(a);
colormap(mape);
axis image;
title('Imagen de Entrada');
axis off;

%Muestra imagen de salida
figure('Position', [300+size(a,2) 250 size(e,1) size(e,2)]);
image(e);
colormap(mape);
axis image;
title('Imagen de Salida');
axis off;

%Muestra la tasa de error de bits, el numero total de errores, y el numero total de bits transmitidos
BER=output1((sizein+2*256),1)
format long, BER;%Cambia el formato de la variable BER para que se muestren 15 digitos dobles
NUMERO_TOTAL_DE_ERRORES=output1((sizein+2*256), 2)
NUMERO_TOTAL_DE_BITS_TRANSMITIDOS=output1((sizein+2*256),3)
```

ANEXO 6

Contenido de *sonido_fin.m*

```
%FINALIZACION DEL SIMULADOR OFDM PARA SONIDO COMO SEÑAL DE
%ENTRADA
clc;
for i=1:sizein
    m(1,i)=output(i+(2*256),1);%Se debe depurar 'output' de tal manera que no se tomen en cuenta
    aquellos
    %binarios resultantes de los retardos de procesamiento
end
n=reshape(m,g(1),g(2));

%Binario a decimal
for i=1:g(1)
    o(i,1)=(2^4)*n(i,1) + (2^3)*n(i,2) + (2^2)*n(i,3)+(2^1)*n(i,4)+(2^0)*n(i,5);
end

p=o*q;%Multiplica por el factor de cuantizacion

%Unipolar a bipolar
r=p-abs(c);
wavwrite(r,fs,nbits,'sonido_salida');

%Muestra las tres formas de onda de sonido: original, cuantizada de entrada y cuantizada de salida
figure('Position', [0 500 1024 700]);
subplot(3,1,1)
plot(a)
title('Señal de Audio Original');
subplot(3,1,2)
plot(b)
title('Señal de Audio de Entrada');
subplot(3,1,3)
plot(r)
title('Señal de Audio de Salida');

%Muestra la tasa de error de bits, el numero total de errores, y el numero total de bits transmitidos
clc
BER=output1((sizein+2*256),1)
format long, BER;%Cambia el formato de la variable BER para que se muestren 15 digitos dobles
NUMERO_TOTAL_DE_ERRORES=output1((sizein+2*256), 2)
NUMERO_TOTAL_DE_BITS_TRANSMITIDOS=output1((sizein+2*256),3)
```

ANEXO 7

Contenido de *psd_ofdm.m*

```
clc
Fs = 1;
figure(1);
plot(c);
h = spectrum.periodogram('hamming');
hopts = psdopts(h,c); % Establece opciones por defecto
set(hopts,'Fs',Fs,'SpectrumType','twosided','centerdc',true);
hpsd = psd(h,c,hopts);
figure(2);
plot(hpsd);
power_freqdomain = avgpower(hpsd) %Integra la función para obtener la potencia
```


REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ¿Que es Simulink?,
http://voltio.ujaen.es/jaguilar/matlab/Manual%20Matlab_Simulink/manual%20simulink/SIM_01%20-%20Que_%20es.htm, Fecha de consulta 26 – 06 – 2007
- Azizul, Mohammad, Performance Evaluation of WiMAX/IEEE 802.16 OFDM Physical Layer, Fecha de publicación 06 – 2007, Fecha de consulta 16 – 09 – 2007
- Bit Error Rate, http://en.wikipedia.org/wiki/Bit_error_rate, Fecha de consulta 23 – 10 – 2007
- Code division multiple access, <http://en.wikipedia.org/wiki/CDMA>, Fecha de consulta 29 – 05 – 2007
- Delay Spread, <http://wireless.per.nl/reference/chaptr03/fading/delayspr.htm>, Fecha de consulta 12 – 06 – 2007
- Dispersive Channel, <http://www.javvin.com/wireless/DispersiveChannel.html>, Fecha de consulta 01 – 12 – 2006
- Galvis, Quintero, Modelos de canal inalámbricos y su aplicación al diseño de redes WiMAX, <http://dSPACE.icesi.edu.co/dSPACE/handle/item/1006>, Fecha de consulta 03 – 07 – 2007
- Goldsmith, Andrea, *Wireless Communications*, Primera Edición, Cambridge University Press, Estados Unidos 2005
- Halford, Steve, Halford, Karen, OFDM Uncovered Part 1: The Architecture, http://www.commsdesign.com/design_corner/OEG20020502S0013, Fecha de consulta 30 – 11 – 2006
- Halford, Steve, Halford, Karen, OFDM Uncovered Part 2: Design Challenges, <http://www.commsdesign.com/showArticle.jhtml;jsessionid=W41ZIRSKYZMPOQSNL0SKH0CJUNN2JVN?articleID=16504952>, Fecha de consulta 30 – 11 – 2006
- IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, Interim Channel Models for G2 MMDS Fixed Wireless Applications, <http://ieee802.org/16>, Fecha de publicación 17 – 11 – 2000, Fecha de consulta 2 – 07 – 2007

- IEEE 802.16, http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.16, Fecha de consulta 2 – 07 – 2007
- Intini, Anibal, Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Wireless Networks, <http://www.create.ucsb.edu/ATON/01.01/OFDM.pdf>, Fecha de publicación Diciembre 2000, Fecha de consulta 10 – 12 – 2006
- L. Hanzo, M. Münster, B.J. Choi, T. Keller, *OFDM and MC-CDMA for Broadband Multi-User Communications, WLANs and Broadcasting*, Primera Edición, John Wiley & Sons Ltd, Inglaterra 2003
- Litwin, Louis, " An introduction to multicarrier modulation", IEEE Potentials, 2000
- OFDM ¿El camino a la 4G?, <http://www.telesemana.com/archivo/Download.php?c=0348211012021-375>, Fecha de publicación 12 – 08 – 2007, Fecha de consulta 16 – 10 – 2006
- Orthogonal frequency division multiplexing, <http://en.wikipedia.org/wiki/OFDM>, Fecha de consulta 04 – 06 – 2007
- Quadrature Amplitude Modulation, http://en.wikipedia.org/wiki/Quadrature_amplitude_modulation, Fecha de consulta 20 – 10 – 2007
- Sklar, Bernard, *Digital Communications: Fundamentals and Applications*, Segunda Edición, Prentice Hall, Estados Unidos 2001
- Spectral Density, http://en.wikipedia.org/wiki/Spectral_density, Fecha de consulta 21 – 10 – 2007
- WiMAX, <http://en.wikipedia.org/wiki/WiMAX>, Fecha de consulta 2 – 07 – 2007

FECHA DE ENTREGA: _____

Sr. Pablo Calderón
AUTOR

Ing. Gonzalo Olmedo
**COORDINADOR DE CARRERA DE INGENIERIA
EN ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES**